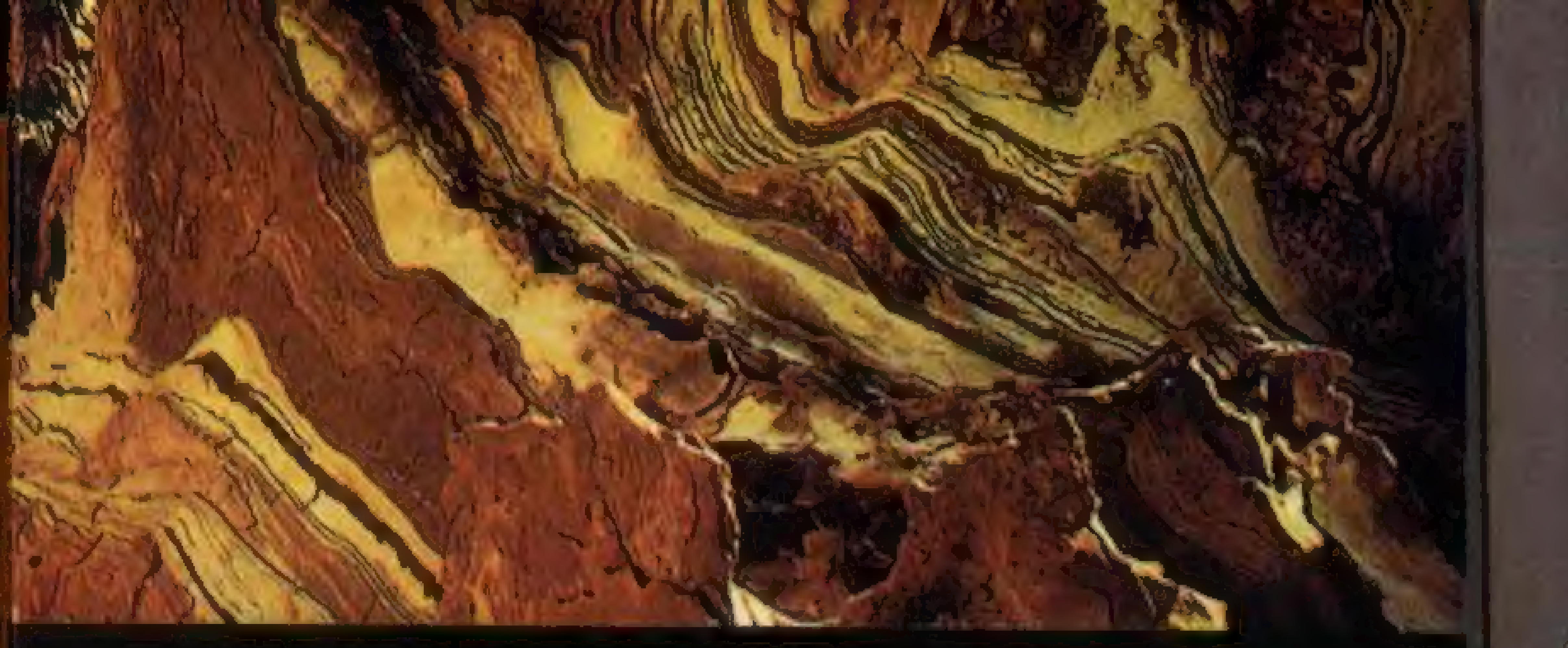


Desde hace miles de millones de años, la corteza de la Tierra ha sido alterada en diversas ocasiones debido a colisiones de sus placas tectónicas. Algunos de estos sucesos terrestres son violentos y efímeros, como las erupciones de los grandes volcanes o los terremotos. Otros, en cambio, son más insidiosos, provocando poco a poco el hundimiento de amplias zonas en el océano o la conversión de extensas áreas de vegetación en desolados desiertos. Los autores de este libro valoran los peligros naturales que amenazan nuestra vida. Plantean las alternativas para el hombre, catástrofe o supervivencia, investigan las implicaciones políticas y sociales del "bombardeo extraterrestre" (meteoritos), consideran las probables repercusiones de los terremotos en el medio ambiente y hacen útiles recomendaciones para paliar los efectos que producirán futuros cataclismos.

Basil Booth es investigador honorario del Imperial College de la Universidad de Londres y una autoridad internacional en el tema de los volcanes.
Frank Fitch es profesor de geología de la Universidad de Londres. Ha dirigido exploraciones geológicas en el Ártico y en África, y es autor de más de cien artículos sobre este tema.



38



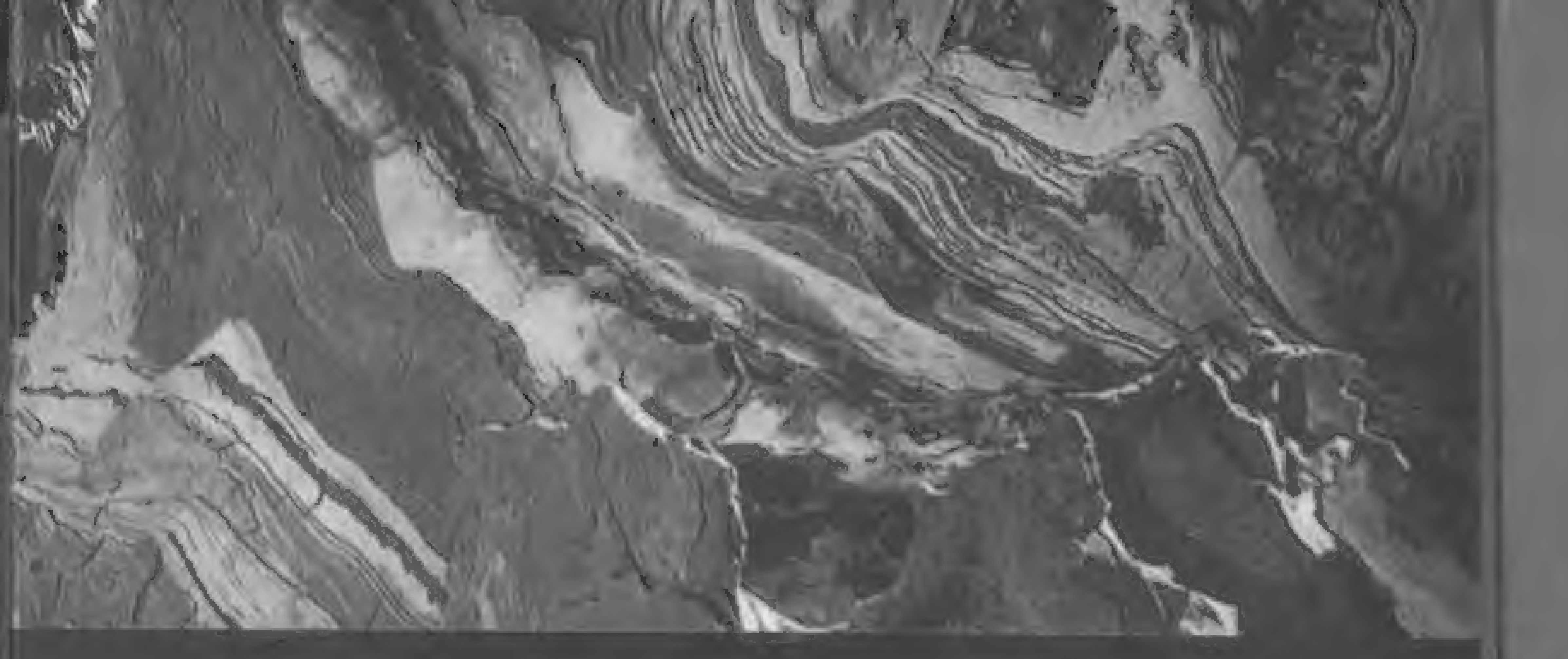


La inestable Tierra

Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales

Basil Booth
Frank Fitch

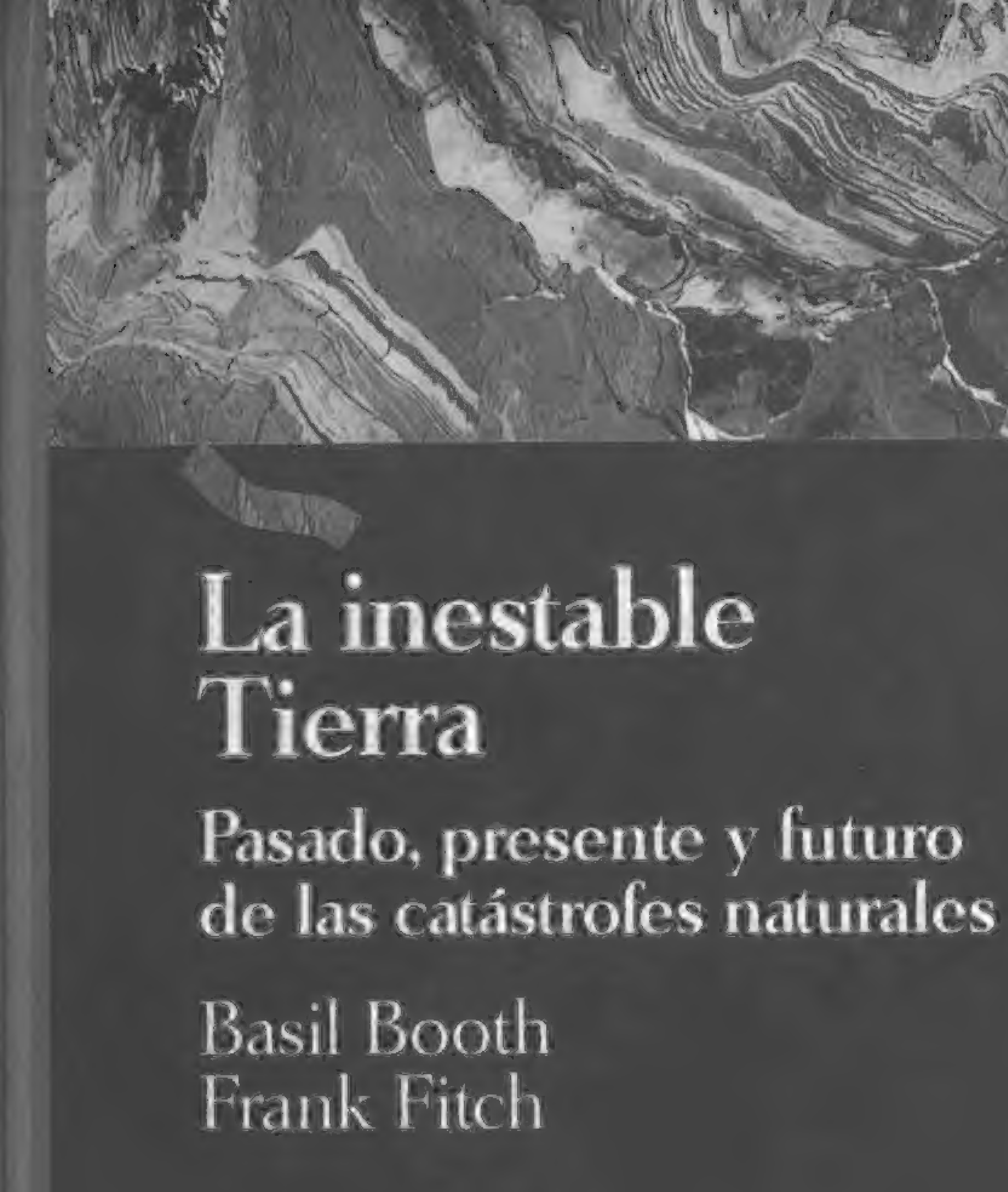
Biblioteca
Científica
Salvat



Desde hace miles de millones de años, la corteza de la Tierra ha sido alterada en diversas ocasiones debido a colisiones de sus placas tectónicas. Algunos de estos sucesos terrestres son violentos y efímeros, como las erupciones de los grandes volcanes o los terremotos. Otros, en cambio, son más insidiosos, provocando poco a poco el hundimiento de amplias zonas en el océano o la conversión de extensas áreas de vegetación en desolados desiertos. Los autores de este libro valoran los peligros naturales que amenazan nuestra vida. Plantean las alternativas para el hombre, catástrofe o supervivencia, investigan las implicaciones políticas y sociales del "bombardeo extraterrestre" (meteoritos), consideran las probables repercusiones de los terremotos en el medio ambiente, y hacen útiles recomendaciones para paliar los efectos que producirán futuros cataclismos.

Basil Booth es investigador honorario del Imperial College de la Universidad de Londres y una autoridad internacional en el tema de los volcanes.
Frank Fitch es profesor de geología de la Universidad de Londres. Ha dirigido exploraciones geológicas en el Ártico y en África, y es autor de más de cien artículos sobre este tema.

La inestable Tierra B. Booth/F. Fitch 58



La inestable Tierra

Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales

Basil Booth
Frank Fitch

Biblioteca Científica Salvat

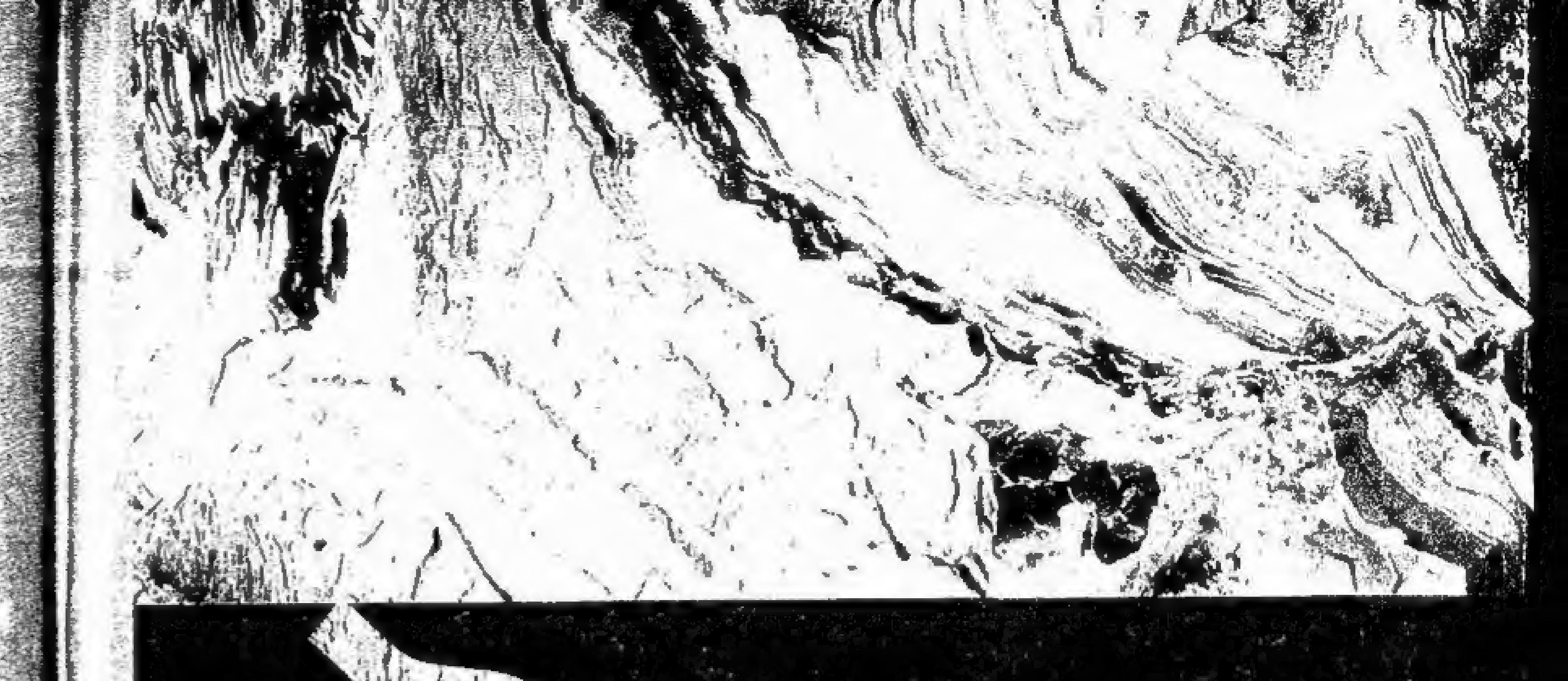


Desde hace miles de millones de años, la corteza de la Tierra ha sido alterada en diversas ocasiones debido a colisiones de sus placas tectónicas. Algunos de estos sucesos terrestres son violentos y efímeros, como las erupciones de los grandes volcanes o los terremotos. Otros, en cambio, son más insidiosos, provocando poco a poco el hundimiento de amplias zonas en el océano o la conversión de extensas áreas de vegetación en desolados desiertos. Los autores de este libro valoran los peligros naturales que amenazan nuestra vida. Plantean las alternativas para el hombre, catástrofe o supervivencia, investigan las implicaciones políticas y sociales del "bombardeo extraterrestre" (meteoritos), consideran las probables repercusiones de los terremotos en el medio ambiente, y hacen útiles recomendaciones para paliar los efectos que producirán futuros cataclismos.

Basil Booth es investigador honorario del Imperial College de la Universidad de Londres y una autoridad internacional en el tema de los volcanes.
Frank Fitch es profesor de geología de la Universidad de Londres. Ha dirigido exploraciones geológicas en el Ártico y en África, y es autor de más de cien artículos sobre este tema.

B. Booth/F. Fitch

38

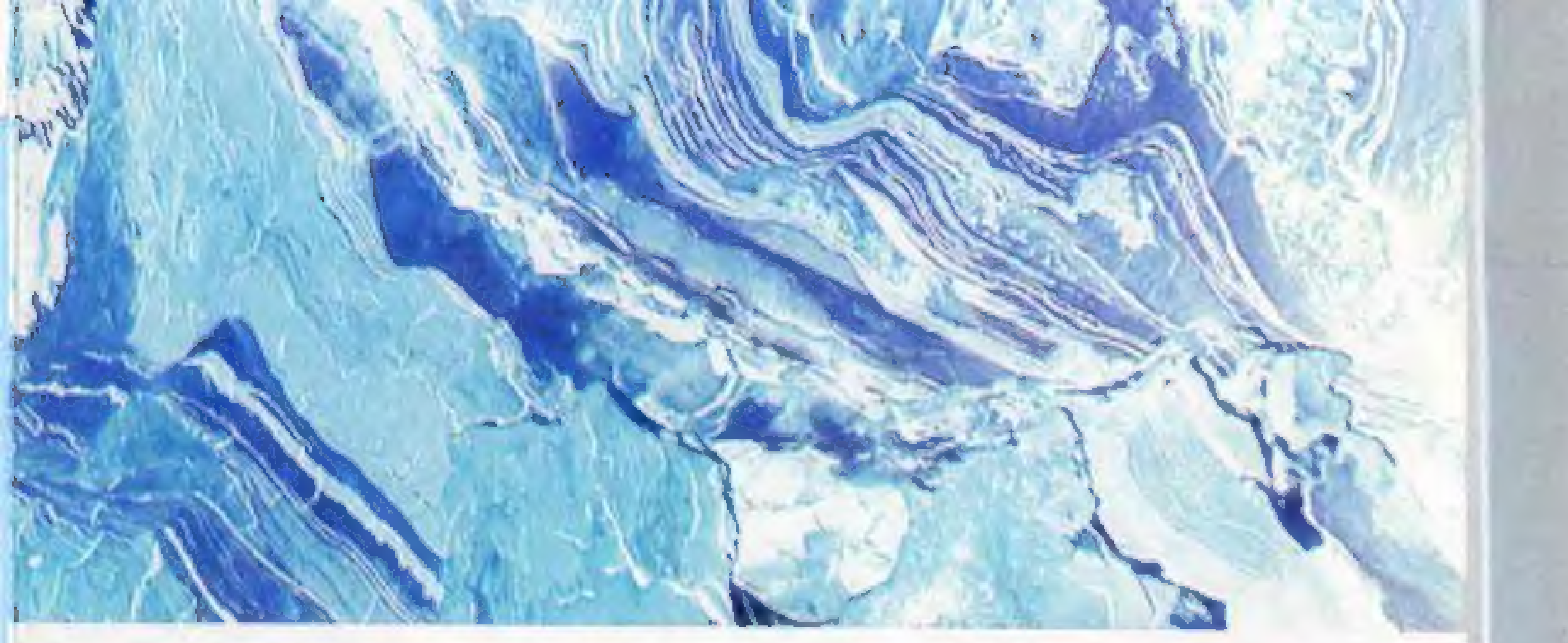


La inestable Tierra

Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales

Basil Booth
Frank Fitch

Biblioteca
Científica
Salvat



Desde hace miles de millones de años, la corteza de la Tierra ha sido alterada en diversas ocasiones debido a colisiones de sus placas tectónicas. Algunos de estos sucesos terrestres son violentos y efímeros, como las erupciones de los grandes volcanes o los terremotos. Otros, en cambio, son más insidiosos, provocando poco a poco el hundimiento de amplias zonas en el océano o la conversión de extensas áreas de vegetación en desolados desiertos. Los autores de este libro valoran los peligros naturales que amenazan nuestra vida. Plantean las alternativas para el hombre, catástrofe o supervivencia, investigan las implicaciones políticas y sociales del "bombardeo extraterrestre" (meteoritos), consideran las probables repercusiones de los terremotos en el medio ambiente, y hacen útiles recomendaciones para paliar los efectos que producirán futuros cataclismos.

Basil Booth es investigador honorario del Imperial College de la Universidad de Londres y una autoridad internacional en el tema de los volcanes.
Frank Fitch es profesor de geología de la Universidad de Londres. Ha dirigido exploraciones geológicas en el Ártico y en África, y es autor de más de cien artículos sobre este tema.

La inestable Tierra
B. Booth/F. Fitch
38



La inestable Tierra

Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales

Basil Booth
Frank Fitch

Biblioteca Científica Salvat



Fichado

La inestable Tierra

Biblioteca
Científica
Salvat

La inestable Tierra

Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales

Basil Booth
Frank Fitch

SALVAT

Versión española de la obra original inglesa *Earthshock*, de Basil Booth y Frank Fitch

Traducción: Miquel Canals
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8918-4 (Volumen 38)
Depósito Legal: B-5101-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Marzo 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

Muchas organizaciones de la UNESCO, de la ONU, multinacionales, nacionales, regionales y privadas están interesadas por uno u otro aspecto de las catástrofes naturales, bien sea por el estudio de los niveles de riesgo, o por el suministro de ayuda a las regiones por ellas afectadas. Cuando proponemos la creación de una agencia u organización mundial para las catástrofes naturales en el seno de las Naciones Unidas, no pretendemos minimizar o denigrar en modo alguno el trabajo sumamente valioso que ya se está realizando en muchos campos. El "Scientific Event Alert Network" de la Smithsonian Institution de Washington, EE.UU., es en la actualidad la mayor fuente de información científica original acerca de los nuevos terremotos, erupciones volcánicas e impactos meteoríticos. El valor de estas y de otras informaciones proporcionadas libremente por las agencias y organizaciones existentes es incalculable. Para la preparación y la redacción de este libro los autores han consultado y extraído datos de centenares de libros, revistas científicas, informes y tesis, además de varios documentos propios de investigación no publicados. Pronto se puso de manifiesto que la inclusión de toda clase de citas bibliográficas extensamente documentadas perjudicaría la continuidad del texto y haría más engorrosa su lectura al lector medio. Por tanto, y no sin ciertas reticencias, las referencias científicas y las notas de pie de página fueron totalmente suprimidas. No obstante, los autores desean expresar aquí su enorme agradecimiento a muchísimos científicos y escritores que trabajan en el campo de las Ciencias de la Tierra y del Espacio, especialmente a sus propios colegas investigadores.

G. Davenport, M. Hobbs, G. Reeve y otros miembros del "Cartographic and Photographic Units" del Birkbeck College proporcionaron su valiosa ayuda en la preparación de las ilustraciones.

Las láminas 1, 24, y 25 fueron cedidas por la NASA; la lámina 4, por la Press Association; las láminas 5 y 7, por la Swiss Tourist Office; las láminas 8, 9, 10, 11, 17, 18 y 19, por la Radio Times Hulton Picture Library; la 12, por Solarfilma; las láminas 13, 14, 15 y 16 son de Lacroix y han sido publicadas por Masson Editeurs, París; las láminas 20 y 21 son de Popperfoto. Las restantes ilustraciones pertenecen a las colecciones de los propios autores.

Finalmente, este libro no habría visto la luz sin la infinita paciencia y esforzada ayuda de Stella Fitch. También debe mucho a Susan Forster, cuya creciente familia le impidió ser uno de los co-autores del mismo. También estamos especialmente agradecidos a Thelma Booth, Caroline Hooker y Melanie Gambold.

INTRODUCCIÓN

Cada día, en algún lugar del mundo, hay gente que muere debido a desastres naturales. La televisión, la radio y los periódicos nos informan casi a diario de algunos grandes desastres. Sin embargo, la mayoría de desastres naturales no son divulgados más allá de las esferas locales. Hoy en día, algunos de nosotros, quizás la mayoría, hemos desarrollado una especie de particular indiferencia ante esas repetitivas narraciones de muerte y destrucción. Esto es debido a que, en la segunda mitad del siglo XX, nos hemos excesivamente familiarizado con la muerte sin sentido de seres inocentes, sangriento tributo que, al parecer, hay que rendir inevitablemente ante los horrores reales y ficticios a los que estamos incesantemente expuestos. Sin embargo, el derecho a la vida es la primera y máxima expresión de la libertad humana. Una sociedad que por falta de una enérgica dirección reflexiva pone innecesariamente en peligro la vida de muchos de sus miembros, bien sea a causa del terrorismo insuficientemente reprimido o de otras actividades criminales, o a causa de desastres naturales de consecuencias previsibles, constituye en muchos aspectos un fracaso tan grande como el más totalitario de los regímenes. Los desastres naturales mataron tres cuartos de millón de personas en 1976; el promedio anual nunca desciende por debajo de los 20.000. Indudablemente, futuras catástrofes naturales traerán la muerte a muchos millones de personas más. Aun en el caso de que el hombre no pueda hacer nada para detener la inevitable progresión de los acontecimientos naturales, sí que puede hacer muchas cosas para minimizar sus desastrosos efectos sobre la vida humana. Evidentemente, al igual que ciertos tipos de actividad criminal, los desastres naturales pueden ser pequeños, locales; en estos casos, la mejor manera de hacerles frente es mediante el esfuerzo individual y/o nacional. Sin embargo, en muchas circunstancias la respuesta local ante ciertos tipos de catástrofes naturales es

totalmente inadecuada. Los desastres naturales no quedan confinados por arbitrarios límites políticos y en numerosas ocasiones países pequeños y mal dotados están expuestos a estos riesgos y no disponen de los medios técnicos de prevención ni de los recursos humanos ni materiales para hacer frente a estos desastres naturales en progreso. Quizás en ningún otro campo de la actividad humana podría ser tan efectiva y provechosa la cooperación internacional: millones de vidas podrían ser salvadas gracias a predicciones acertadas, evaluaciones del riesgo, y control y mitigación de los peores efectos de las catástrofes naturales. Obviamente, no basta movilizar las fuerzas de la compasión mundial con la inevitable demora, una vez que el evento ya ha causado espectaculares destrozos y un alto número de víctimas. La actitud de algunas naciones —especialmente China y Rusia— que impiden el libre acceso a las áreas dañadas y la difusión de la información relacionada con la catástrofe durante muchos años supone un grave obstáculo para los esfuerzos internacionales que aspiran a mejorar la cooperación internacional en este campo. En nuestra opinión, las Naciones Unidas deberían disponer de un organismo mundial de control de los desastres naturales, el cual estuviese dotado de ciertos poderes de supervisión que le permitiesen investigar y estar preparado ante todo tipo de desastres naturales que ocurriesen en cualquier lugar del mundo, que fuese capaz de proporcionar la ayuda material y científica necesaria en todo momento, y que no estuviese sujeto a injerencias políticas. No es ninguna exageración afirmar que la forma, incompleta, fragmentada y políticamente manipulada, en que el hombre hace frente actualmente a las catástrofes naturales es uno de los más claros exponentes de la estupidez colectiva de la humanidad

En este libro hablaremos de los posibles desastres naturales que pueden ocurrir en el futuro a la luz de los conocimientos obtenidos a lo largo de dos siglos y medio de investigación en el campo de las Ciencias de la Tierra y del Espacio. James Hutton abrió el camino para que los geólogos pudieran explorar el pasado de nuestro planeta tal y como ha quedado registrado en las rocas: Hutton demostró que, en la formación de las rocas, "el presente es la clave del pasado". Pero esta máxima también es cierta si le damos la vuelta: el pasado es asimismo la clave del futuro. Los geólogos se han dado cuenta de que en la historia de la Tierra hay registradas innumerables catástrofes naturales, algunas de proporciones gigantescas, y que cualquiera de ellas puede repetirse una y otra vez en el futuro. Ante esta constatación, debemos preguntarnos: ¿Por cuánto tiempo podrá sobrevivir el hombre sobre la Tierra?

La Tierra es un planeta fascinante, y cuanto más aprendemos acerca de él, más demuestra serlo. Aquí es donde hemos evolucionado, la Tierra es nuestra casa, pero, debido a que la especie humana no lleva en ella ni siquiera una milésima parte del tiempo transcurrido entre la formación del planeta y la actualidad, nuestra experiencia directa acerca de su historia es muy limitada. Tenemos algunos conocimientos acerca de los peligros que pueden derivarse de las tormentas, incendios, inundaciones, y de algunos terremotos y erupciones volcánicas, por lo que consta en el recuerdo de los acontecimientos históricos; sin embargo, no tenemos ni la más mínima experiencia acerca de muchos otros grandes peligros potenciales que la exploración geológica de la Tierra y la del espacio (la Luna y los planetas más cercanos) han puesto de manifiesto. Sin duda, la Tierra deparará al hombre muchos acontecimientos desagradables. Para darnos cuenta del factor de riesgo potencial tenemos que examinar y comprender la historia de la Tierra y del Sistema Solar durante los últimos 5.000 millones de años, y tenemos que descubrir e interpretar las escasas evidencias de pasados desastres registradas en las rocas. Todo ello nos servirá para prever qué es lo que puede ocurrir en el futuro. Incluso un estudio superficial de la historia de la Tierra basta para demostrar que éste ha sido un planeta excepcionalmente violento. ¿Estamos analizando los riesgos naturales presentes y futuros con el rigor suficiente? Debería existir un organismo internacional encargado de coordinar los esfuerzos mundiales en el campo de la investigación y control de los riesgos naturales.

La moderna concepción del mundo es muy diferente de la que tenían nuestros antepasados. En la Edad Media no se apreciaba el carácter transitorio de muchas de las cosas que nos rodean y se creía que la mayoría de desastres naturales eran debidos a la intervención de fuerzas sobrenaturales en los asuntos humanos. La geología, la ciencia encargada de estudiar la Tierra y su historia, tuvo unos comienzos muy lentos y difíciles. Únicamente en los últimos 100 años ha empezado a valorarse en su justa medida la utilidad de las informaciones que los geólogos experimentados pueden extraer de las rocas. El conocimiento directo de la Luna y de nuestros restantes vecinos intraplanetarios ha comenzado hace apenas 20 años. La correcta medición del tiempo geológico y el cálculo preciso de la edad de la Tierra y de los restantes planetas, así como de eventos específicos de su pasado histórico, son de vital importancia para que podamos evaluar los peligros naturales presentes y futuros; estas mediciones dependen de nuestros conocimientos acerca de la radiactividad. La datación precisa de las rocas también es un avance científico muy reciente. Actualmente, sabemos que la Tierra tiene unos 4.600 millones de años de antigüedad. Si, para darnos perfecta cuenta de lo que este intervalo de tiempo representa, lo reducimos a una escala cuyas unidades sean lapsos de 24 horas, en la que cada día representase 1.000 millones de años, veremos que el hombre apareció sobre la Tierra aproximadamente a las 14.28 horas del quinto día

INTRODUCCIÓN

y que en estos momentos son solamente las 14.40 horas ¡del mismo día! La geología nos muestra que cada minuto de esos cinco días de historia de la Tierra ha estado lleno de actividad, a la vez gradual y muy a menudo violenta. ¿De qué manera leen los geólogos en el "registro de las rocas"? ¿Pueden las personas que no tengan conocimientos sobre la materia, ver y darse cuenta por sí mismas de algunas de esas evidencias? ¿Cuáles son las peores catástrofes que la Tierra va a depararnos en el futuro?

Los terremotos matan con la mayor sencillez; son catástrofes naturales en el sentido más físico del término. En tiempos históricos los terremotos han ocasionado la muerte de millones de personas. No pasa ni un solo año sin que se produzca algún gran terremoto. La destrucción de Lisboa en el año 1755 causó un profundo efecto sobre el pensamiento europeo de finales del siglo XVIII. La experiencia de estar cerca del centro de un gran terremoto, incluso fuera de una gran ciudad, es algo terrorífico. La destrucción causada por los terremotos puede devastar totalmente las zonas urbanas, y además el hambre y la peste y las enfermedades subsiguientes pueden provocar muchas más muertes. Algunos terremotos generan las temibles olas marinas sísmicas o tsunamis. Los terremotos que se han registrado en la Tierra incluso en las últimas décadas han provocado auténticas carnicerías. ¿Cuál es el origen de los terremotos? ¿Existe en las rocas algún indicio que permita prever que en el futuro se pueden producir terremotos incluso más violentos que los peores ocurridos en tiempos históricos? ¿Pueden predecirse o prevenirse los terremotos? ¿Qué deberíamos hacer para protegernos de esta amenaza constante si vivimos en una zona de alto riesgo sísmico?

Las montañas nacen y desaparecen, pero las fuerzas que originan tales hechos persisten y están lenta y constantemente en acción modificando la faz de nuestro planeta. La corteza de rocas de la Tierra tan sólo tiene unos pocos kilómetros de espesor semejante a una cáscara de huevo, y está rota por varios sitios y dividida en varias placas móviles independientes. Existen profundas corrientes de rocas fundidas que mueven lentamente estas placas como si se tratase de almadías flotantes; todos nosotros vivimos encima de esas almadías, de las almadías continentales. A lo largo de los tiempos geológicos, las placas oceánicas y continentales han estado bailando en una y otra dirección, soldándose a veces para constituir enormes supercontinentes y separándose posteriormente para generar una miríada de pequeñas placas que prosiguen el baile. La formación y la consunción incesante de antiguas placas en otras nuevas forma parte de este ritual. El reciente descubrimiento de la tectónica de placas y de sus mecanismos nos permite comprender por qué en continentes distintos y alejados hay faunas parecidas, cómo funcionan los volcanes y los terremotos, y de qué maneras se fusionaron los continentes en los tiempos antiguos. La distribución de la actividad sísmica y volcánica de la Tierra está directamente relacionada con las posiciones de los bordes de placa, que pueden ser constructivos, como las dorsales medio-oceánicas, y destructivos, como ciertos márgenes continentales o arcos insulares. El estudio de los movimientos de las placas nos permite descubrir hechos tales como el subcontinente indio, que se desgajó de la Antártida y se desplazó hacia el norte hasta chocar con Asia, originándose a raíz del choque el Himalaya y la meseta tibetana; nos permite saber, por ejemplo, por qué las evidencias de antiguas edades de hielo se hallan actualmente en zonas tropicales. No hay duda de que el baile de los continentes es el responsable de muchas de las cosas que suceden en nuestro planeta. Determina la posición de los depósitos de combustibles fósiles y de los yacimientos minerales y, en general, la distribución de todos los recursos naturales de los que depende nuestra propia existencia. Si bien los lentos movimientos continentales no revisten un carácter tan dramático como otros acontecimientos, sus efectos a largo plazo pueden ser devastadores, originando volcanes y terremotos en lugares en los que actualmente no hay ni asomo de ellos, provocando el hundimiento de grandes porciones de terreno por debajo del nivel del mar, haciendo emerger los fondos marinos, y empujando de nuevo a otros continentes en su inexorable desplazamiento hacia las inmensas soledades heladas de los casquetes polares.

Desde tiempos inmemoriales, los volcanes han sido contemplados con miedo y superstición. En la antigüedad se les consideraba dioses, o cuando menos, la morada de los dioses, donde Vulcano forjaba sus rayos para Júpiter y las flechas de Cupido. El año 2500 antes de Cristo, una isla griega explotó en medio de una tremenda erupción volcánica; con ella desapareció la floreciente civilización minoense y eso dio pie a la leyenda de la Atlántida. El año 1669, el Etna, en Sicilia, entró en erupción y al parecer provocó 100.000 muertes. Si cualquiera de esos eventos volviese a producirse hoy en día, el número de víctimas alcanzaría cotas desorbitadas. Tan sólo en Sicilia, el número de víctimas causado por el Etna a lo largo de su historia podría alcanzar entre un millón y dos millones de personas; si en el Egeo se reprodujesen olas gigantes, como las del año 2500 antes de Cristo, millones de personas morirían en las costas ahora altamente pobladas de Grecia y Turquía. Sin embargo, y aunque la actividad volcánica puede reducir drásticamente la población en determinadas zonas, es improbable que la misma origine cambios mundiales de nefastas consecuencias. A largo plazo, el mayor riesgo derivado del vulcanismo mayormente es una contaminación atmosférica tan elevada que provoque cambios en el clima mundial. Las densas nubes de polvo volcánico pueden hacer que los inviernos se alarguen y sean más rigurosos, pudiendo llegar incluso a desatarse otra edad de hielo. Investigaciones recientes han demostrado que ciertas

erupciones cataclísmicas en muchos de los volcanes considerados dormidos, o incluso extintos, podrían devastar áreas tan grandes como la mitad del estado de California, barriendo casi instantáneamente del mapa ciudades como Portland (EE.UU.), Tokio o Roma. Los gobiernos de muchos países seriamente amenazados no son conscientes de lo que el futuro puede depararles, especialmente si adoptan la nefasta actitud de "eso no puede sucedernos a nosotros". Pero, sí puede.

A lo largo de los tiempos geológicos, los continentes han estado sometidos repetidas veces a edades de hielo intermitentes y a inundaciones generalizadas. Es geológicamente cierto que esos procesos continuarán y en la actualidad incluso existe una elevada posibilidad de que se restablezcan condiciones glaciales en el hemisferio norte; esto acarrearía la ruina de ciudades como Nueva York, Washington, Londres, París y Moscú. El hambre, en unas proporciones sin precedentes, surgiría a raíz de la conversión de buenas tierras agrícolas en tundras o de su enterramiento bajo una gruesa capa de nieve; esta situación determinaría una dramática reducción de la población mundial. Por otra parte, la fusión de un casquete de hielo podría ser igualmente desastrosa, ya que el nivel del mar podría aumentar más de 100 metros, inundando casi todas las principales ciudades del mundo y muy probablemente más del 75 por ciento de los terrenos agrícolas. ¿Tienen los gobiernos del mundo la madurez suficiente para hacer frente a una catástrofe de estas características? La reciente idea de romper y derretir grandes bloques de hielos polares mediante procedimientos termonucleares con el fin de obtener agua dulce entraña unos riesgos extraordinarios, ya que puede llegar un momento en que los casquetes de hielo sean incapaces de autorregenerarse. Tanto si es por congelación como por inundación, el resultado final sobre nuestro dividido planeta sería parecido; la actual civilización tal como la conocemos ahora sería aniquilada, el hambre y las enfermedades reducirían drásticamente la población mundial y, quizás, volveríamos a un modo de vida general parecido al de la Edad Media.

Cada día de nuestra vida estamos en peligro de morir por el impacto de cuerpos extraterrestres que se aproximan a gran velocidad. Millones de objetos diminutos caen como gotas de lluvia sobre la Tierra. Otros cuerpos mayores colisionan más infrecuentemente con nuestro planeta. Investigaciones recientes han demostrado que la Tierra puede ser golpeada por un proyectil extraterrestre de varios kilómetros de diámetro al menos una vez cada 50 millones de años. La caída de objetos de menor tamaño, llamados meteoritos, es tanto más frecuente cuanto menor es el tamaño de los objetos. Los cometas siempre han sido tenidos por malos augurios; la devastadora explosión que ocurrió en el río Tunguska, en Siberia, en 1908, ha sido atribuida a la colisión de un pequeño miembro de esta familia —sólo la millonésima parte de la masa de un cometa medio. Los cráteres que, como el Meteor Crater, en Arizona, se han formado a raíz del impacto de meteoritos medianos empiezan a ser bastante bien conocidos. La gama de tamaños de los fragmentos procedentes del bombardeo espacial —en su mayor parte originarios del cinturón de asteroides— ha podido ser calculada gracias a las recientes misiones espaciales y vuelos de sondas planetarias que han transmitido fotografías, y en algunos casos traído y/o analizado "in situ" muestras de rocas, de la Luna, Marte, Mercurio y Venus. La meteorización y la erosión destruyen rápidamente las cicatrices de antiguos impactos sobre la Tierra; los procesos sedimentarios y los movimientos corticales contribuyen a enterrar y deformar tales cicatrices. Sin embargo, por la experiencia que se va acumulando lentamente, cada vez parece más evidente que a lo largo de su historia nuestro planeta ha recibido tantos impactos como sus vecinos galácticos. Cada año aumenta el número de estructuras identificadas como "astroblemas" resultantes de antiguos impactos y eventos de craterización. ¿Qué efectos tendría la colisión de un gran asteroide, de tamaño similar, por ejemplo, al que originó el cráter de Tico en la Luna hace 100 millones de años, sobre alguna de las áreas más densamente pobladas de Norteamérica? ¿Podría un impacto de esta naturaleza destruir la vida sobre la Tierra tal y como la conocemos? ¿Estamos tomando lo bastante en serio este riesgo remoto, pero sin embargo tremendamente real? ¿Existe la posibilidad de que se desate por error una guerra nuclear de represalia si un gran proyectil extraterrestre destruye inesperadamente una de las grandes ciudades de Rusia o de Occidente? ¿Debería constituirse un servicio internacional de vigilancia que controlase la posible aproximación de grandes cuerpos intraplanetarios? ¿Si uno de éstos se dirige hacia la Tierra, tiene el hombre alguna posibilidad de evitar el desastre?

La respuesta a la pregunta "¿Pueden el hombre y su planeta sobrevivir?" está basada necesariamente en imponderables; en parte, quizás depende del propio hombre y de la evolución social que experimente durante el próximo siglo. En vista de los hechos, parece que los hombres deberían limar sus diferencias, llegar a un equilibrio con las fuerzas que les rodean y cooperar honestamente y a escala mundial para predecir cuándo y dónde va a producirse la próxima catástrofe natural. Además, el hombre como colectivo debe al mismo tiempo estar siempre dispuesto a aliviar el sufrimiento de las regiones azotadas por las grandes catástrofes enviando los recursos necesarios allí donde sean más convenientes.

INTRODUCCIÓN

I. EL PLANETA VIOLENTO

¡Oh Dios! ¡Aquel que puede leer el libro del destino
y ver que la revolución de los tiempos
hace que las montañas se allanen, y los continentes,
cansados de tan sólida firmeza, se derritan
en los mares!

William Shakespeare, *El Rey Enrique IV*

Existe la equivocación popular de que el investigador
científico se halla en la obligación de no ir más allá
de la generalización de los hechos observados...
pero cualquiera que esté prácticamente familiarizado
con las actividades científicas sabe que aquellos
que se niegan a ir más allá de los hechos,
rara vez van más lejos.

T. H. Huxley

La noche del 23 de marzo de 1997, bajo un sereno cielo salpicado de estrellas, el buque mercante "Eldritch III" surcaba las aceitosas aguas del Atlántico Norte a 30 nudos de velocidad, enfilando hacia su puerto de base, Nueva York. Larry Petersen, de 30 años de edad y nacido en Brooklyn, estaba de guardia, cómodamente instalado en el puente. La extraordinaria calma de las aguas parecía tener algo de misterioso, a pesar de que él ya había visto períodos de calma igualmente extraordinarios con anterioridad. "Es la calma que precede a la tempestad", pensaba al tiempo que revisaba maquinalmente la consola de indicadores para asegurarse de que todo funcionaba correctamente en el buque. No vio ninguna luz de alarma encendi-

da: el enorme buque navegaba a la perfección, guiado por un sofisticado sistema de control computadorizado. En el panel luminoso podía observarse su situación exacta: 350 millas al ENE de las Bermudas, y unas 800 millas afuera de los Estrechos de la entrada del río Hudson. No había ninguna otra embarcación en un radio de 100 millas. El jefe de máquinas, Ian McPherson, un escocés que con 57 años era el miembro de más edad de toda la tripulación, entró en el puente con un termo de café caliente y dos tazas.

"Es la quietud de la muerte", dijo, mientras pasaba una taza de humeante café a Larry. Una hora más tarde, los dos hombres aún estaban sentados en silenciosa compañía cuando una rosada aurora empezó a dibujarse lentamente hacia el este. De repente, el barco y las aguas que lo rodeaban quedaron envueltos en una extraña luz de un blanco verdoso procedente del sur y cuya intensidad iba rápidamente en aumento.

"¿Qué diablos es eso?", rugió el jefe McPherson al tiempo que cruzaba el puente para poder mirar desde mejor ángulo lo que estaba ocurriendo hacia el sur. Después de una rápida revisión de los instrumentos y de los indicadores de la consola, Larry se le unió en su contemplación. En lo alto del cielo, una gigantesca bola de fuego, más de dos veces mayor y más brillante que la luna llena, estaba cruzando rápidamente el cielo en dirección hacia el NNO.

"Un bólido", dijo el jefe, quien a lo largo de sus 34 años en la mar ya había visto de todo. "Pero mayor que todos los que he visto u oído contar en mi vida." Lo vieron cruzando el cielo durante unos diez segundos; mientras se desplazaba iban produciéndose enormes llamaradas y chispazos de luz roja y azul que iluminaban lo que parecía ser una especie de larga cola oscura. Al pasar por encima de sus cabezas se dieron cuenta que el cuerpo principal del bólido parecía tener una forma más cilíndrica que esférica. Finalmente, con un brillo demasiado intenso para mirarlo directamente, desapareció detrás del horizonte justo enfrente del "Eldritch III". Por un momento, se hizo de nuevo la oscuridad alrededor del barco, pero al cabo de un instante un relámpago gigantesco surgió del lugar en que el bólido había desaparecido: el resplandor fue tan cegador que ambos hombres se volvieron instintivamente de espaldas. Durante unos segundos fueron incapaces de ver nada más, pero entonces, igual que un sol posado saliendo del brumoso horizonte oriental, la serpenteante y larga cola del bólido, de tenue luz, devino claramente visible recortándose contra el cielo.

"Fantástico", exclamó Larry, quien había quedado atónito ante tal despliegue natural de fuegos de artificio.

"En el verano del 76, aguas afuera de Harwich, al este de Inglaterra, vi un bólido", comentó el jefe, "pero éste debe ser el padre de todos ellos."

"¿Cuál es su causa?", preguntó Larry.

"Son cometas o meteoritos que rozan la atmósfera terrestre", respondió McPherson, aunque lo cierto es que Larry ni siquiera le oyó. Tenía puesta toda su atención en los acontecimientos que se estaban produciendo encima de la raya del horizonte. Miraba cómo iba ascendiendo lenta y majestuosamente un gran hongo de nubes grises y blancas hacia la estratosfera un poco al este de donde el bólido había desaparecido.

"Parece una bomba de hidrógeno, Ian", intentó decir, pero sus palabras eran inaudibles debido al estruendo seguido del retumbar de las deflagraciones en el cielo provocadas por el bólido y su cola al repercutir su choque como truenos. El barco vibró bajo esa especie de tormenta sonora, pero, de todos modos, prosiguió su rumbo sin la menor desviación. El jefe se abalanzó hacia la consola para verificar las lecturas de sus queridos aparatos. Larry le siguió rápidamente, retomando su posición habitual en el puente. En el momento en que acababa de comprobar todos los indicadores, apareció en el puente el capitán Jim Barnes, un tipo alto y estoico, natural de Nueva Inglaterra; al igual que el jefe, tenía más de 30 años de experiencia en el mar.

"¿Qué opinas, Ian?", preguntó el capitán. "¿Acaso ha empezado la Tercera Guerra Mundial?"

"No", respondió dubitativamente McPherson, para agregar con mayor firmeza: "Podría haber sido una nave espacial nuclear estrellándose contra la Tierra, pero creo que ha sido un meteorito gigante que pasó sobre nosotros y se ha hundido en el mar."

"¿A qué distancia?", inquirió Barnes.

"A unos pocos cientos de millas", replicó McPherson. "El impacto se ha producido a las 6.41 horas", añadió. El capitán Barnes le miró fríamente durante un segundo, después pulsó el botón de emergencia.

Se sentó en su sillón y tomó el micrófono.

"Atención, les está hablando el capitán", dijo pausadamente; "quiero que toda la tripulación ocupe sus puestos de emergencia, que cierren todas las escotillas y que trinquen todos los objetos móviles. Quiero que lo hagan en 10 minutos. ¡Rápido!" Larry miró, perplejo, al capitán.

"Puede que nos golpee una ola gigante, señor Petersen. En el mejor de los casos, es de esperar que el tiempo empeore mucho", explicó el capitán. "Miren esas nubes."

Larry volvió a observar el horizonte. En la lejanía, y en un arco de 30°, el cielo estaba cubierto por una nube espumosa y ondulante, negra como el carbón en la parte inferior y blanca como la nieve en la parte de arriba; y además progresaba rápidamente con un penacho en forma de cuña hacia la estratosfera. Mientras tanto, una fina línea de nubes negras y grises, situadas al pie del hongo, empezó a avanzar lentamente a partir de la raya del

horizonte. A las 7.20, en el preciso instante en que el capitán Barnes tomó de nuevo su micrófono para transmitir otro mensaje a la tripulación, tres enormes detonaciones sacudieron todo el barco. Pocos minutos después, el jefe McPherson, que había bajado de nuevo a la sala de máquinas, reapareció en el puente con su gran reloj de bolsillo en la mano.

"La zona del impacto debe estar situada a unas 390 millas enfrente de nosotros", informó al capitán. "Es muy probable que se produzcan algunos tsunamis dentro de una hora aproximadamente." Miró pensativamente a Jim Barnes, y añadió: "En la costa de Nueva Inglaterra se espera un tiempo horrible si se producen grandes tsunamis." Sabía que la familia del capitán vivía en una casita cerca de la playa, en Rhode Island. Jim Barnes pensó en todos ellos un momento, pero reaccionó rápidamente y, tomando el teléfono acoplado en el brazo de su asiento, llamó al operador de radio para que le pusiese en contacto con la Oficina Principal de radiotelefonía. Al cabo de pocos momentos estaba hablando con el armador, en la oficina de la compañía naviera en Nueva York. Muy pronto supo que toda la Costa Este de los Estados Unidos, desde Boston a Norfolk, se había visto iluminada por un relámpago cegador poco antes del amanecer y que a continuación se habían oído tres enormes explosiones, más o menos a las 7.25. Nadie sabía la causa: los programas matinales de noticias se habían hecho eco de numerosas especulaciones, pero la respuesta oficial de Washington era "Sin comentarios". En Nueva York el tiempo era bueno, pero hacia el este la visibilidad era escasa debido a la presencia de un espeso banco de niebla marina, por encima del cual podían verse pesadas nubes de tormenta. El capitán Barnes informó de todas las observaciones y conclusiones a que habían llegado tanto su jefe de máquinas como él mismo, haciendo especial hincapié en la probabilidad de que un tsunami destructivo asolase la Costa Este. La voz del otro lado del teléfono era cortés pero no parecía excesivamente preocupada; Barnes pidió entonces que le pusiesen en comunicación con la centralita, y al cabo de dos minutos estaba hablando con su familia.

"Dejad lo que estéis haciendo, meteros todos en el coche e iros tan hacia el interior como os sea posible, hacia las montañas, tan rápidos como podáis", le ordenó a su mujer después de haberle dado una breve explicación acerca de lo que podía ocurrir y recordarle los desastres ocasionados por el tsunami que ambos habían visto años atrás en las islas Hawaii.

Eran las 7.40 de la mañana. Antes de que ella pudiese replicarle, el capitán colgó el teléfono y se dirigió de nuevo a Larry.

"¿Sus padres viven en Brooklyn, señor Petersen?"

"Viven en el décimo piso de un edificio nuevo, señor; no deberían tener problemas", musitó sonriendo.

"Bien", replicó el capitán, intentando disimular la escalofriante inquietud por la seguridad de su mujer e hijos que se reflejaba en su cara y en su comportamiento. Guiñó un ojo y volvió a mirar hacia el cielo: un cambio atemorizador se había producido en los últimos minutos. Los sectores oeste y norte del horizonte que les rodeaba estaban totalmente cerrados por un extenso banco de nubes amenazadoras en cuyo interior se iban produciendo relámpagos. Delante de la nube, el Sol aún brillaba lo suficiente como para iluminar una vibrante cinta plateada que se extendía a lo largo de todo el horizonte; en los veinte minutos siguientes todos pudieron ver cómo la cinta plateada iba creciendo hasta convertirse en una ola enorme de más de 60 metros de alto que avanzaba hacia ellos a razón de unas 300 millas por hora. A las 7.50 de la mañana la proa del barco empezó a levantarse.

"Mire eso, señor McPherson", dijo el capitán. Dándole una suave palmada en la espalda, reemplazó a Larry Petersen en la consola principal, en cuya silla se sentó inclinado hacia delante asiéndose fuertemente a los brazos de la misma. Afuera, el agua estaba agitada y arremolinada por fuertes ráfagas de viento; mientras, iba creciendo paulatinamente enfrente del barco la cresta montañosa, situada aún a 80-100 millas de distancia pero aproximándose rápidamente. Aproximadamente a las 8.10, el "Eldritch III" fue levantado trabajosamente hasta la cresta de la enorme ola y empezó a caer encarado a lo que parecía ser un pozo que conducía directamente al infierno. El agujero hacia el que se hundía el barco era tan profundo como alta era la enorme ola que instantes antes le había levantado como si se tratase de un cascarón de nuez, y el mar se veía allí de una fría negrura uniforme. Después, fueron llegando otras olas muy grandes recubiertas de espuma y que iban por delante de un muro de nubes negras atormentadas increíblemente alto y que les iba envolviendo como una mortaja. El Sol quedó repentinamente tapado por las nubes que se extendían rápidamente, mientras el barco se precipitaba hacia delante en medio de las tinieblas a pesar de que los motores estaban girando a un cuarto de su velocidad normal.

Durante las cuatro horas siguientes, el "Eldritch III" fue zarandeado, sacudido, golpeado por lluvia y granizo, e inundado por grandes olas del peor tifón de la historia, levantándose y cayendo hacia el abismo una y otra vez a medida que iban pasando las gigantescas olas. Sin embargo, ninguna de esas olas era comparable con la primera. La segunda en tamaño no tenía más de 30 metros de alto, y las siguientes menos de 10 metros, excepto cuando las ráfagas de viento hacían cabalgar unas olas sobre las otras, alcanzándose entonces tamaños también considerables. Durante el tifón, las interferencias eléctricas fueron tan fuertes que las comunicaciones por radio devinieron de todo punto imposibles, a pesar de que el radiotele-

grafista informó haber oído débiles e indescifrables llamadas de socorro. A mediodía. la tormenta se calmó tan rápidamente como había empezado y el "Eldritch III" continuó avanzando. ahora a velocidad otra vez normal. sobre un mar bastante quieto cubierto por retazos de nubes. El capitán Barnes respiró hondo y cedió su puesto en la consola principal a Larry Petersen. Cogió el micrófono manual para anunciar el final de la emergencia. Sin embargo. antes de que pudiese pronunciar una sola palabra. el radiotelegrafista irrumpió en el puente. pálido y con los ojos desorbitados.

"Toda la costa atlántica de los Estados Unidos ha sido barrida", gritó. "La ola les ha golpeado entre las 8.30 y las 9. Nueva York. Washington. Boston... ¡todo ha sido destruido! El vicepresidente estaba en Los Ángeles. ha vuelto y ha declarado la ley marcial: ¡es un desastre nacional!"

El desastre había sido general en toda la costa atlántica estadounidense. Entre la Isla de Nantucket y el Cabo Hatteras. todo había sido completamente inundado y destruido por las tres grandes olas. No había quedado ni un solo edificio en pie. y había muy pocos supervivientes. La anchura de la franja de terreno devastada dependía de la topografía local: en las zonas con costa baja. las aguas de la primera ola habían penetrado hasta 50 millas tierra adentro: en otras zonas más abruptas. los acantilados y montañas habían impedido la penetración de la ola hacia el interior del país. Aparte de la franja costera. los mayores destrozos se habían producido en los principales valles fluviales —enormes olas habían remontado los cursos del Hudson. el Delaware. el Susquehanna. el Potomac. el James y otros ríos parecidos. provocando muchos daños materiales y grandes pérdidas de vidas humanas en Albany. Filadelfia. Harrisburg. Baltimore. Washington. Richmond y otras muchas ciudades y pueblos. Sin embargo. los peores daños se habían producido en las ciudades y pueblos situados a la orilla del mar: Norfolk. en Virginia: Atlantic City: Nueva York y las ciudades costeras de Connecticut y Rhode Island. En el Cabo Cod y en las islas de la costa atlántica —Nantucket. Martha's Vineyard. Long Island— y en muchas llanuras costeras de Delaware. Maryland. Virginia y Carolina del Norte no quedó ni rastro de las construcciones humanas previamente existentes. En Boston se produjeron daños muy importantes. pero gracias al efecto protector de la península del Cabo Cod la ciudad se salvó de la destrucción total que había asolado las zonas más bajas de Nueva York.

Otro lugar terriblemente azotado fue Bermuda. donde no hubo supervivientes. Más allá de los límites de la zona totalmente devastada. Halifax y Charleston se vieron muy afectados por la catástrofe. y también se produjeron daños muy importantes en Florida. las Bahamas. Terranova. las Azores y en otros muchos puntos: muchos barcos y yates fueron engullidos

por las aguas. Al día siguiente del impacto el "Eldritch III" rescató a tres supervivientes del naufragio de un pequeño yate: en su ruta hacia Nueva York el mar estaba materialmente cubierto de despojos de la catástrofe. El buque se desvió hacia el Golfo del San Lorenzo siguiendo órdenes del propietario. el cual había estado de vacaciones en Suiza. El capitán Barnes y su tripulación respiraron satisfechos cuando supieron que el Presidente estaba vivo y que. de hecho. estaba dirigiendo activamente las tareas de rescate y reconstrucción: las primeras informaciones acerca de su muerte fueron provocadas por el colapso de todo el sistema de comunicaciones en Washington y a lo largo de la costa atlántica. La buena noticia de que la familia de Barnes se había salvado de la tragedia. adentrándose unas 35 millas en el interior del país antes de que el tsunami alcanzase la costa de Rhode Island. se vio ensombrecida por la confirmación procedente de Brooklyn de que no había quedado ni rastro del edificio en que vivían los padres de Larry Petersen. En total se perdieron más de 10 millones de vidas humanas en las costas del océano Atlántico en unos instantes de un horror terrorífico. El mundo nunca podría volver a sentirse seguro.

Lo que acabamos de narrar es, por supuesto. ciencia ficción: nunca ha ocurrido, y tal vez no ocurra jamás. un desastre natural de tal envergadura. Sin embargo. sabemos que de vez en cuando impactan sobre la Tierra grandes meteoritos cuya caída puede provocar daños como éste o incluso a una escala mucho mayor. Hace tan sólo 86 años. en 1908. un impacto meteorítico acaecido en una alejada región de Siberia provocó una explosión equivalente a la de una bomba atómica de 30 megatones. y desde entonces se han ido identificando en el resto del mundo enormes cicatrices causadas por impactos meteoríticos. Así pues. y a diferencia de la mayor parte de textos de ciencia ficción que se escriben hoy en día. nuestra historia acerca de la destrucción de Nueva York y de la costa atlántica estadounidense es un acontecimiento científicamente *posible* en un futuro indeterminado.

Nuestra intención ha sido demostrar la extraordinaria magnitud de los daños que puede causar tan sólo uno de los muchos fenómenos naturales que. ocasionalmente. pueden tener un carácter catastrófico. En este libro trataremos de los principales riesgos naturales a que está sometida la vida sobre la Tierra —el nutridísimo bombardeo extraterrestre. los movimientos sísmicos. el vulcanismo. las oscilaciones del nivel del mar. los cambios climáticos y de otros tipos—. catástrofes naturales que pueden provocar la muerte de millones de seres o producir cambios ambientales tan grandes que las formas vivientes tales como las conocemos sean incapaces de ser mantenidas



Fig. 1. Hace unos 25.000 años un meteorito de un millón de toneladas cayó a gran velocidad sobre la Tierra en Arizona. A consecuencia de su paso por la atmósfera terrestre su parte exterior estaba ya incandescente y había empezado a fragmentarse antes de que el impacto se produjese; cuando éste ocurrió, el meteorito se desmembró por completo y se vaporizó parcialmente en medio de una tremenda explosión que excavó un cráter de 180 metros de profundidad y de unos 1.200 metros de diámetro.

Los geólogos saben que, desde los primeros tiempos, nuestro planeta se ha visto sacudido por terribles catástrofes, mucho mayores de las que se han producido en tiempos históricos, y saben también que tales acontecimientos continuarán produciéndose mientras la Tierra exista. La historia geológica de nuestro planeta es como una increíble sucesión de cambios sin fin y de violencia natural. Durante miles de millones de años, la leve epidermis rocosa que constituye los continentes sobre los que vivimos ha sido comprimida, fragmentada y reensamblada un gran número de veces

por fuerzas de origen profundo. La Tierra está continuamente sometida a la violencia natural del vulcanismo, los terremotos, la subsidencia, los alzamientos, los plegamientos, las fallas, las tormentas, los huracanes, las inundaciones, el fuego, la sequía, las glaciaciones y los bombardeos espaciales: continuamente van incorporándose a los niveles superficiales fragmentos de rocas fundidas procedentes del interior de la Tierra; los fragmentos desmembrados de continentes se desplazan lentamente sin cesar, colisionando unos con otros formando nuevos continentes cada vez mayores, los cuales están, a su vez, destinados a desmembrarse en un futuro más o menos lejano mientras siga el ciclo inexorable de cambios y violencia. Los geólogos creen que la Tierra continuará en este estado de actividad durante los próximos miles de millones de años.

En las rocas de cada continente están registrados un número indeterminable de eventos geológicos mayores y menores, cada uno de los cuales revestiría las características de una catástrofe para el género humano si se produjese en nuestros días, y está científicamente demostrado que tales acontecimientos ocurrirán de nuevo una y otra vez en el futuro. El hombre tiene que prepararse ante catástrofes naturales de tales dimensiones, las cuales pueden provocar la muerte de millones de seres y la desaparición de civilizaciones enteras. Y esto no es una exageración. En la actualidad, mientras nadie pueda predecir más exactamente lo que nos reserva el futuro, gracias a concienzudos estudios desarrollados a lo largo de los últimos 250 años, los geólogos están ahora en disposición de advertirnos, por un lado, acerca de la inevitabilidad de diversos tipos de *catástrofes naturales* que sin duda ocurrirán *en un futuro más o menos lejano* y, por otro lado, permiten desechar muchas predicciones efectuadas sin ningún fundamento científico. La extracción del petróleo del Mar del Norte no puede, por ejemplo, provocar el hundimiento por colapso de las islas que rodean dicho mar; tampoco es posible que como consecuencia de una guerra atómica la Tierra se aparte de su órbita. Es evidente que el egoísmo y la irresponsabilidad del hombre pueden ocasionar graves daños en el ambiente y hacer que la vida sea mucho menos agradable para las generaciones venideras, pero todo el poder destructivo que podemos generar hoy día es aún absolutamente insignificante comparado con las fabulosas fuerzas de la Naturaleza. Ninguno de los ingenios construidos por el hombre puede liberar una cantidad de energía comparable con la que se liberó en el gran terremoto de Assam, el año 1950, o igualar la erupción paroxismal del Bezymianny, en Kamchatka, en 1956. Y esos dos eventos que hemos citado como ejemplo no son sino pequeños acontecimientos, a escala geológica, dentro de la sucesión continua de acontecimientos naturales que se producen en nuestro planeta; de hecho, situados en el contexto de la historia terrestre, ambos

Tabla 1-1. Comparacion entre varios tipos de desastres naturales

Tipo de desastre	Principal perdida conocida de vidas humanas	Máxima pérdida de vidas humanas estimada para un desastre futuro
Inundaciones por causa de lluvias	En junio de 1931, en la provincia de Honan, China, el Yangtse y el rio Amarillo mataron entre 1 y 2 millones de personas	2-3 millones
Terremoto	El 24 de enero de 1556, en la provincia de Shensi, China, un terremoto provocó la muerte de 830.000 personas	1-1,5 millones
Tsunami de origen sísmico	Bahía de Bengala, 1876, grandes olas de marea mataron a 215.000 personas	0,25-0,5 millones
Tsunami de origen volcánico	Krakatoa, 27 de agosto de 1883, olas de marea mataron a 36.417 personas	100.000-200.000
Erupción volcánica	La erupción del Etna del año 1669 destruyó Catania, Sicilia, matando a 100.000 personas	1-2 millones
Tifón o huracán	El 8 de octubre de 1881 un tifón causó 300.000 víctimas en Haiphong, Vietnam	0,5-1 millón
Tormenta	El 26 de noviembre de 1703 una tormenta causó 8.000 muertes en el Canal de Inglaterra	10.000-20.000
Corrimiento de tierras	El 16 de diciembre de 1920 un corrimiento de tierras mató a 200.000 personas en la provincia de Kansin, China	0,25-0,5 millones
Alud	El 13 de diciembre de 1941 un alud ocurrido en Huaras, Perú, mató a 5.000 personas	10.000-20.000
Plagas y epidemias	«La Muerte Negra», un persistente brote de peste bubónica acaecido en el siglo xiv, provocó la muerte de 25 millones de personas en toda Europa	Muchos millones
Hambre (debida a la sequía y a otras causas)	En Bengala, en 1943 y 1944, 1,5 millones de personas murieron de hambre	Muchos millones

Tabla 1-1. *(continuación)*

Tipo de desaste	Principal pérdida conocida de vidas humanas	Máxima perdida de vidas humanas estimada para un desastre futuro
Impacto de un asteroide	No conocido en tiempos históricos	Cientos de millones
Retorno a una edad de hielo o importante elevación del nivel del mar	No conocido en tiempos históricos	Cientos de millones a través del hambre

Otros posibles desastres no incluidos en la tabla: crecimiento incontrolado de la población mundial; agotamiento de las fuentes de energía; agotamiento de las materias primas; expansión incontrolada de un defecto genetico, ya sea natural o resultante de la «ingeniería genetica»; crecimiento incontrolado de las poblaciones de insectos o de otras especies nocivas para el hombre; holocausto termonuclear; contaminación irrecuperable de los mares, la tierra o el aire; guerra biológica; destrucción de estructuras artificiales, tales como puentes, presas o túneles; pérdida del control sobre ingenios construidos por el hombre, como los robots, las estaciones espaciales, etc.; invasión procedente del espacio (no necesariamente por seres inteligentes; la invasión por un virus desconocido podría ser igualmente catastrófica para el hombre).

acontecimientos son insignificantes, no son sino dos más entre una multitud de acontecimientos de parecida o mayor envergadura.

Las limitaciones de nuestra experiencia directa en relación con los riesgos naturales constituyen un grave problema. El tiempo que el hombre lleva en la Tierra equivale a menos de una milésima parte de la edad absoluta de la misma; además, hay muy pocos datos acerca de los desastres naturales padecidos por nuestros antecesores. La catástrofe natural más antigua que se conoce fue la rápida inundación que arrasó un lecho fluvial seco en Etiopía hace unos 3 millones de años; a causa de ello, un pequeño grupo familiar de seres primitivos, hombres, mujeres y niños, se ahogó. Los restos esparcidos de sus esqueletos, enterrados bajo sedimentos fluviales y lacustres, fueron hallados en Afar durante el verano de 1975. Las inundaciones inesperadas aún se cobran muchas vidas cada año: en 1952, el desastre de Lynmouth causó 34 víctimas en Inglaterra (lámina 4), y en 1972, 237 personas murieron en las inundaciones que afectaron a Rapid City, en Dakota del Sur. Estos breves datos demuestran que aún no hemos aprendido a salvaguardarnos de este riesgo natural, a pesar del tiempo que hace que la humanidad experimenta sus desagradables consecuencias. En nuestra moderna sociedad, los pequeños desastres naturales incontrolados se cobran cada año alrededor de 20.000 víctimas: avalanchas de nieve, corri-



Fig. 2. "Estamos constantemente en peligro de muerte." Cuando el Vesubio entró en erupción, el año 79, las personas y los animales que quedaron atrapados en la floreciente ciudad romana de Pompeya sufrieron muertes atroces. La mayoría de los 20.000 habitantes de Pompeya pudieron escapar a tiempo, pero unos 2 000 quedaron atrapados para siempre. Se han hallado los moldes de esos infortunados y de sus animales conservados por las cenizas volcánicas. Durante la noche del 24 de agosto es probable que las personas que aún quedaban en Pompeya se viesen imposibilitadas de abandonar el escudo protector de sus hogares debido a la intensísima lluvia de lapilli ardiente. El peso de las cenizas y las escorias provocó el hundimiento de las techumbres; de este modo muchas personas agazapadas en las casas quedaron enterradas vivas; otras murieron asfixiadas por los gases letales que emanaban las capas de lapilli. La destrucción de las populosas ciudades de Herculano, Pompeya y Estabia, debido a la erupción de un volcán que por aquel entonces era considerado como extinto, constituyó un profundo impacto para el pueblo romano

mientos de tierras, huracanes, tormentas o tsunamis, erupciones volcánicas son referidos por la prensa mundial, y los terremotos pueden producir muchos miles de muertes cada año. En los años malos el número de víctimas puede elevarse a 1 ó 2 millones, y tenemos que admitir que en cualquier momento catástrofes más importantes pueden eliminar decenas o centenares de millones de seres humanos.

La recensión de los datos históricos relativos a los últimos 1.000 años muestra que el hombre ha estado sometido incluso en ese relativamente

corto período de tiempo a una increíble sucesión de violentos desastres naturales. Dejando de lado el hambre, la peste, las plagas y otros tipos de desastres biológicos, parece ser que las mayores catástrofes naturales individuales ocurridas durante dicho período han tenido lugar en China. Los terremotos de los años 1556 y 1976, en la provincia de Shensi y alrededor de Tientsin, respectivamente, provocaron la muerte, cada uno, de medio millón a un millón de personas: las inundaciones del año 1931 en la provincia de Honan causaron un millón y medio de víctimas. Sin embargo, para aquellos que se han visto directamente involucrados, todos los desastres naturales, incluso cuando la pérdida de vidas humanas es relativamente pequeña, son igualmente terribles, tal y como vamos a mostrar en las páginas siguientes con ejemplos extraídos de la vida real.

Érase un espléndido día de otoño del año 1619; casi todos los hombres de Dughabad, en la provincia de Kuhistan (Irán), estaban en los campos, ocupados en las tareas de recolección de lo que al parecer iba a ser una buena cosecha de grano. En el pueblo se festejaba alegremente la boda de la hermana de uno de los más influyentes ciudadanos. De repente, sin ningún aviso previo, Dughabad fue sacudido por un tremendo terremoto. En cuestión de minutos, el floreciente pueblo había quedado reducido a un montón de escombros y polvo. Setenta mujeres murieron en el festejo nupcial; la novia escapó milagrosamente lanzándose debajo de la enorme viga del travesaño de la puerta de la casa. En total, murieron entre 700 y 800 personas, la mayoría mujeres. El festejo se convirtió en un funeral. Después de las operaciones de rescate y una vez enterrados todos los muertos, en Dughabad no quedaba ni un solo muro en pie. Aunque la ciudad fue reconstruida al cabo de los años, nunca volvió a tener su anterior riqueza e importancia. Los hombres y las mujeres del Daghabad del siglo XVII habían sufrido los trágicos efectos de un desastre natural incomprensible para ellos.

En el año 1700, después de cuatro años de duros trabajos, el ingeniero inglés Henry Winstanley (realizador de las obras del rey Carlos II) vio finalizada su obra maestra —catalogada como una de las maravillas del mundo—: el primer faro de Eddystone. Era un gran polígono de madera de 30 metros de alto apoyado sobre una base de roca: señalaba un grupo de peligrosos escollos situados en el paso entre Start Point y el Lizard, en el Canal de la Mancha. Los escollos de Eddystone están situados a nueve millas de la costa de Cornualles y a catorce millas al SSO del importante puerto de Plymouth: sólo son visibles durante la bajamar y son un serio peligro para la navegación desde los tiempos de los romanos. Winstanley y

sus coetáneos sólo podrían festejar su triunfo sobre las fuerzas de la naturaleza durante poco menos de tres años: una gran catástrofe natural les estaba aguardando. Sobre la una de la mañana del 27 de noviembre de 1703 se desató en el Canal y en el sur de Inglaterra una de las peores tormentas que jamás el hombre ha visto en esas latitudes. Truenos, rayos, granizo, lluvia y ráfagas de viento huracanado azotaron la región hasta primeras horas de la tarde. Hubo mareas excepcionalmente altas en los estuarios del Támesis y el Severn, las cuales provocaron inundaciones. En el mar, flotas enteras fueron dispersadas y otros barcos más pequeños se hundieron para siempre. El faro de Eddystone quedó destruido y su diseñador murió. La devastación fue completa a lo largo de toda la costa del Canal. En el Puente de Londres, el Támesis estaba obstruido por pecios y restos de los barcos naufragados. Las ciudades de Londres y Bristol parecía que acabasen de sufrir una guerra. Casas, mansiones, campanarios y miles de árboles fueron derribados. Las tejas de los tejados volaban por las calles, las chimeneas y las almenas se desplomaban. Los grandes robles plantados en St. James's por el Cardenal Wolsey bajo el reinado de Enrique VIII fueron arrancados de cuajo y de los centenares de tilos, acacias y olmos de la Reina Ana no quedó ni rastro. En total, murieron 8.000 personas, desde el obispo de Bath y Wells hasta un elevado número de "valerosos hombres irremediablemente perdidos para siempre en el mar". Nadie en el sur de Inglaterra olvidaría esta terrible tormenta.

El 26 de marzo de 1812 era un día apacible y tranquilo en Caracas, Venezuela. Era el día de Jueves Santo y la mayor parte de la población estaba en el interior de las numerosas iglesias que constituían una destacada característica de la ciudad. Nada parecía indicar la terrible calamidad que se avecinaba. Sin ningún aviso previo, a las cuatro menos siete minutos, se manifestó el primer indicio de gran terremoto que iba a producirse. Esta primera sacudida fue lo bastante importante como para hacer sonar las campanas de las iglesias: duró cinco o seis segundos, durante los cuales el suelo adquirió un suave movimiento ondulatorio como si de la superficie de un líquido hirviente se tratase. Cuando los movimientos del suelo cesaron, se pensó que el peligro ya había pasado, pero, antes de que el miedo que había sentido la gente hubiese desaparecido, de repente se oyó un tremendo ruido subterráneo, parecido a un cañonazo o al retumbar de un trueno, pero más fuerte y más persistente que los truenos que se desatan en las peores tormentas tropicales. El pánico volvió a apoderarse de la gente, pero lo único que podían hacer era rezar. Al espantoso ruido siguieron violentos movimientos del suelo que se prolongaron por espacio de tres o cuatro segundos. Estos movimientos eran ascendentes y descendentes y

tenían una amplitud de algunos metros: a continuación, se produjeron varias ondulaciones de menor intensidad y de período más largo que, al parecer, se movían de norte a sur y de este a oeste. Ninguno de los edificios que por aquel entonces existían en Caracas pudo resistir tales series de sacudidas: la ciudad quedó completamente destrozada. Entre nueve y diez mil personas quedaron sepultadas bajo los escombros de las casas y de las iglesias, en total un 90 por ciento de las construcciones de la ciudad quedaron completamente destruidas. En los alrededores de Caracas se produjeron enormes deslizamientos de tierras, algunos lagos se secaron parcialmente y nacieron varias fuentes en lugares totalmente secos. Según el famoso naturalista prusiano Barón von Humboldt, en Caracas y en las regiones adyacentes perecieron 20.000 personas a causa de este inesperado y violento terremoto.

La montaña más alta de la Isla Norte de Nueva Zelanda es el Ruapehu (2.795 m), un volcán andesítico activo (véase el capítulo 5) que tiene nieves perpetuas en su cima. En el ancho cráter de este volcán compuesto de cenizas-lava-lahar hay un lago que tiene más de 600 metros de diámetro. Periódicamente, la temperatura y la acidez del lago aumentan debido a la entrada de gases volcánicos calientes por su fondo: cuando esto ocurre, las aguas empiezan a desprender vapor por toda su superficie y el lago se cubre de una espuma sulfurosa amarilla y maloliente. Después de una erupción ocurrida en 1948, el desagüe del lago quedó obstruido por una mezcla de hielo y fragmentos volcánicos. Como consecuencia de ello, el nivel de las aguas fue aumentando gradualmente año tras año, hasta que en la noche de Navidad del año 1953, las aguas acumuladas en el cráter, con la ayuda de un pequeño incremento de la actividad volcánica, rompieron la barrera de hielo y fragmentos volcánicos y se desparramaron casi instantáneamente alrededor de 2.300 millones de litros de aguas calientes y ácidas. El nivel del lago descendió nueve metros. Un terrorífico lahar (un *lahar* es una colada de fango compuesta por cenizas y rocas procedentes de los muros del cráter colapsado, fragmentos de roca volcánica procedentes de las vertientes de la montaña, y fango procedente del fondo del lago, todo ello lubrificado por las ácidas aguas) volcánico se vertió en las aguas de cabecera del río Whangaehu, que drena la vertiente sur del Ruapehu. La línea férrea de Auckland a Wellington cruza el río unas cuantas millas más abajo, en el puente de Tangiwai. El 24 de diciembre de 1953 podía oírse el pitido del expreso viajando a través de la noche. El expreso y el lahar, en sus carreras convergentes, iban a encontrarse irremediablemente. El lahar alcanzó el puente de Tangiwai cinco minutos antes que el tren, llevándose por delante las vías en una cascada de lodo hirviente, rocas y agua. Cuando

el tren alcanzó el río Whangaehu, se hundió en el espeso y arremolinado torrente de lahar. La máquina y los vagones fueron arrastrados río abajo; muchos de ellos quedaron aplastados como cajitas de papel. En total murieron 151 personas; la muerte les llegó, de una forma terrible e incomprensible, la víspera de lo que iba a ser una alegre Navidad.

El mayor terremoto del siglo azotó la "gran isla" de Hawaii a las 4.48 horas de la madrugada del día 29 de noviembre de 1975. Tuvo una magnitud de 7.2 en la escala de Richter (véase el capítulo 4), con epicentro situado en Kalapana, en la costa sudeste de la isla. Una sacudida previa ocurrida a las 3.36 puso sobre aviso a la mayor parte de habitantes, incluidos 32 excursionistas que habían acampado en Halape, cerca de la playa, unas pocas millas al oeste de Kalapana. La sacudida provocó algunos desprendimientos de rocas en una colina situada detrás del campamento; algunos campistas se fueron hacia la playa, pero la mayoría de ellos se fueron de nuevo a dormir. Cuando, al cabo de una hora, se desató el terremoto principal, se produjeron nuevos desprendimientos de rocas. En el apogeo de este terremoto los movimientos del suelo eran tan violentos que los campistas no podían tenerse en pie. En cuestión de un minuto más o menos fueron alcanzados por un mar en rápido ascenso, el cual rápidamente adquirió la forma de una gran ola rompiente. Una segunda ola, mayor y más turbulenta, siguió a la primera y barrió a árboles, rocas y personas hacia el interior de una grieta de unos seis metros de profundidad que las enfurecidas aguas batían periódicamente. Un superviviente describió la experiencia diciendo que "parecía que estuviésemos dentro de una lavadora". Una persona murió ahogada y a otra las aguas se la llevaron mar adentro. La altura máxima alcanzada por el tsunami u ola sísmica fue de unos 15 metros; penetró hacia el interior hasta unos 100 metros de la playa. Podría decirse que los campistas supervivientes habían vuelto a nacer. Los daños fueron cuantiosos en todo Hawaii. Una pequeña erupción asociada se produjo en la caldera del volcán Kilauea.

Los desastres naturales pueden revestir un carácter repentino y dramático, como en los ejemplos que acabamos de narrar, pero también pueden dejar sentir sus efectos de forma insidiosamente lenta, no dejando aparecer todo su horror mas que al ir acumulando una muerte tras otra. Los cambios climáticos son uno de los principales desastres pertenecientes a esta segunda categoría. Uno de esos cambios alcanzó su máxima expresión a mediados de los años 70 en las regiones tropicales de Asia y África. La ausencia de las lluvias habituales provoca la sequía que produce la desertización creciente de muchas regiones antaño fértiles, de modo especial, por ejemplo, a lo largo del límite septentrional del desierto del Sahara. La cada vez mayor desnutrición, la depauperación y finalmente la muerte son el pan de cada día para muchos pueblos primitivos y los rebaños de ganado atrapados por esta sutil forma de desastre natural. En las regiones superpobladas, como la India y China, incluso los pequeños accidentes climáticos pueden provocar espantosas épocas de hambre, especialmente si afectan a las cosechas alimenticias básicas para esas regiones. En este sentido, las inundaciones provocadas por un exceso de lluvia pueden tener efectos tan perniciosos sobre la agricultura como la sequía.

Otros tipos de catástrofes naturales lentas suelen tener un carácter eminentemente local: avances de los despiadados glaciares y de los casquetes de hielo, la erosión persistente de las líneas de costa, hundimiento gradual de extensas regiones próximas al mar, y los cambios graduales provocados en las regiones orogénicamente activas. Hay en los tiempos históricos centenares de ejemplos representativos de este tipo de catástrofes que, aparentemente, no revisten tal carácter. Mediado el siglo XX se produjo un importante retroceso en algunos glaciares del este de Groenlandia; este hecho dejó al descubierto los restos de pequeñas comunidades medievales que habían permanecido sepultados bajo los hielos a raíz de un avance de los mismos iniciado a mediados del siglo XVII. La grandiosa ciudad de Faterhpur Sikri, "la ciudad de la victoria", construida en la India por el emperador musulmán Akbar al sudoeste de Agra entre 1569 y 1572, tuvo que ser abandonada al cabo de 50 años debido a la falta de suministros de agua. La renombrada ciudad medieval inglesa de Dunwich, antigua capital de los territorios independientes de East Anglia, tenía más de 200 iglesias en el siglo XIV, pero en la actualidad sólo quedan de ella unas pocas casas, ya que el trabajo de zapa subterránea del mar se ha encargado de provocar progresivamente el hundimiento de las restantes.

En 1830 se descubrió que la plataforma del templo romano de Júpiter, cerca de Pozzuoli, en la Bahía de Nápoles, se encontraba tan sólo 30 cm por debajo del nivel de pleamar, pero las tres esbeltas columnas que se apoyaban sobre la misma estaban perforadas por organismos marinos hasta una altura de más de 7 metros. Según las referencias históricas, el templo fue construido en tierra firme por encargo del emperador Marco Aurelio en el siglo II. Por tanto, entre la época de Marco Aurelio y el año 1830, el templo había sufrido un hundimiento de al menos 7 metros por debajo del nivel del mar y posteriormente había sido levantado de nuevo, todo ello lenta y suavemente, sin que se cayesen las columnas de mármol. Para los geólogos de comienzos del siglo XIX esto era una prueba evidente de la existencia de cambios lentos pero persistentes en la altura relativa y la distri-

bución de tierras y mares. Actualmente se sabe que la subsidencia y los alzamientos lentos de las áreas costeras son un fenómeno generalizado en todo el mundo; asimismo, la deriva continental en relación con el eje de rotación de la Tierra es también un proceso incesante. Todos estos cambios se producen a velocidades variables, desde muy lentas hasta bastante rápidas en algunas áreas especialmente activas. A veces, la intervención del hombre puede complicar sensiblemente las cosas. Se ha dicho, por ejemplo, que la sobreexplotación de los acuíferos costeros puede estar acelerando la subsidencia lenta pero inexorable de la hermosísima ciudad de Venecia por debajo del nivel del mar.

Las catástrofes naturales no siempre causan perjuicio al hombre: en muchos lugares del mundo hay tierras extremadamente fértiles resultantes de antiguas erupciones volcánicas. Además, numerosas islas y países, como Hawaii e Islandia, se han formado gracias a la actividad sísmica y volcánica. Sin embargo, los eventos naturales violentos, como los terremotos, los "lahars" o el bombardeo meteorítico, son inevitablemente catastróficos para los individuos afectados por los mismos; y los efectos a largo plazo de las catástrofes naturales pueden ser igualmente desastrosos para comunidades enteras.

¿Cómo podemos prever los riesgos que nos depara el futuro? Cualquier previsión de los riesgos futuros debe tener en cuenta tanto los datos acumulados en los últimos decenios como las evidencias de catástrofes ocurridas a lo largo de toda la historia de la Tierra. La presencia del hombre sobre la Tierra es, dentro de la historia del Universo, un hecho muy reciente. Nuestro género, *Homo*, probablemente evolucionó en África hace unos 4 ó 5 millones de años; un lapso de tiempo tremendamente breve en comparación con la edad de la Tierra: 4.600 millones de años. Los datos más antiguos acumulados por el hombre moderno acerca de las catástrofes naturales en escritos, esculturas y pinturas rupestres no van más allá de 30.000 años atrás. Por tanto, nuestros conocimientos acerca de la implicación directa del hombre en las grandes convulsiones naturales, procesos y cataclismos son muy limitados y sólo representan, en el mejor de los casos, una pobre muestra de la actividad pretérita de la Tierra. Obviamente, en un período de tiempo tan breve, las posibles perturbaciones de origen extraterrestre de la vida sobre la Tierra aún están peor representadas.

En estas circunstancias, ¿cuánto tiempo podrá sobrevivir el hombre sobre la Tierra? ¿Es nuestra extinción un hecho inevitable? ¿Seremos destruidos por las fuerzas de la Naturaleza o, por el contrario, aprenderemos a dominarlas? ¿Nos estamos tomando lo bastante en serio los riesgos naturales presentes y futuros? ¿Debería crearse un organismo internacional de prevención y control de los desastres naturales que se encargase de coordinar los esfuerzos mundiales en este terreno? Para los científicos que estudian la Tierra estas cuestiones son mucho más importantes que los cotilleos políticos que cubren las páginas de nuestros periódicos. Para discutir con suficiente conocimiento de causa acerca de estos temas y para poder evaluar el factor de riesgo es necesario comprender científicamente los procesos naturales de la Tierra y conocer toda la sucesión de las repetidas catástrofes acumuladas en el registro fósil de las rocas durante los 4.600 años de historia de la Tierra. Lo cierto es que nuestros datos documentales sobre los grandes terremotos y erupciones volcánicas ocurridos en tiempos históricos (como el terremoto de Tientsin, en julio de 1976, que provocó la muerte de medio millón de personas, y la explosión volcánica de la isla de Krakatoa en 1883) constituyen una muestra muy pequeña de toda la violencia natural que es capaz de desatarse en la Tierra

II. EL REGISTRO DE LAS ROCAS

Mañana, y mañana, y mañana,
se desliza día a día con su modosito paso,
hasta la última sílaba del tiempo rememorado;
y todos nuestros ayeres tienen duendes iluminados
a lo largo del camino hasta la polvorienta muerte.

William Shakespeare, *Macbeth*

Uno de los principales problemas con que nos encontramos al estudiar la historia de la Tierra es la utilización de unos períodos de tiempo distintos de los habituales. Estamos familiarizados con hechos que transcurren en segundos, minutos, horas, días, semanas, meses, años e incluso siglos, pero el paso de esta escala humana del tiempo a la escala en que se producen los procesos de la Tierra no es fácil. Dentro de la escala del tiempo geológico los acontecimientos se suceden a intervalos de millones o centenares de millones de años. Cuando damos un paseo por el campo, no es difícil imaginarse que las colinas y los ríos que vemos siempre han estado allí, pero eso no es cierto. El conocimiento geológico de la historia de la Tierra nos dice que todo lo que vemos sobre su faz es transitorio. Incluso los principales elementos de la actual geografía del mundo no son más que efímeras expresiones, dentro de la escala del tiempo geológico, de los procesos que actúan sobre nuestro planeta. Estudios recientes han demostrado, por ejemplo, que en ningún lugar del mundo la corteza terrestre por debajo de los grandes océanos tiene más de 250 millones de años de antigüedad, y que generalmente la mayor parte de ella es mucho más joven. En diversas partes del planeta se está formando actualmente nueva corteza oceánica. Nos damos cuenta, por tanto, de que las rocas graníticas que constituyen la

corteza de los continentes a pesar de parecer "permanentes" se han fragmentado y se han vuelto a unir de manera siempre diferente una y otra vez y han estado sometidas a una serie de procesos interminables a lo largo de los últimos 2.500 millones de años

Si un observador situado en el espacio hubiese filmado los 4.600 millones de años de historia de la Tierra y después nosotros pudiésemos ver esa película proyectada en cámara rápida. nuestra concepción de la Tierra. ese lugar invariable que contemplamos durante nuestro paseo por el campo. cambiaría radicalmente: en la proyección de tiempo abreviado la Tierra se mostraría como un globo móvil extremadamente activo. en nada parecido a los planetas "muertos" como la Luna. Mercurio o Marte. cuyas superficies nos son ahora familiares gracias a las fotografías de los astronautas y satélites espaciales. Por debajo del siempre cambiante torbellino de las tormentas. los huracanes y los sistemas ciclónicos atmosféricos de la Tierra, veríamos el incansable discurrir de las corrientes oceánicas y los avances y retrocesos alternativos de los grandes casquetes de hielo. Tomando una escala de tiempo mayor. observaríamos los desplazamientos de los continentes. cómo se dividen y cómo se coliden: también veríamos las convulsiones. los levantamientos y hundimientos de la endeble corteza terrestre. Contemplaríamos cómo una y otra vez las aguas inundan extensas áreas continentales para retirarse posteriormente dejando al descubierto nuevas tierras. Especialmente espectacular sería ver el continuo escape explosivo de gases calientes. mezclados o no con rocas fundidas. a través de los conos volcánicos repartidos por numerosas regiones del mundo. que actúan a modo de válvula de escape de seguridad y permiten la disipación del calor interior de la Tierra cuando éste ha alcanzado temperaturas locales excesivamente altas. La impresión de conjunto sería la de estar contemplando un planeta en ebullición extremadamente activo, cambiante y violento. La tripulación de una nave espacial difícilmente podría creer, viendo lo que acabamos de reseñar. que un planeta así pudiese estar habitado. Probablemente llegarían a la conclusión de que, aun admitiendo que hubiese podido existir alguna forma de vida sobre ese planeta, tendría que enfrentarse con una catástrofe tras otra de tal forma que sus posibilidades de sobrevivir a tal procesión de terremotos. inundaciones. erupciones y bombardeos del espacio serían nulas

Sin embargo. sabemos que la vida ha surgido y ha evolucionado en la Tierra. debido quizás en parte a la permanente actividad que en ella se desarrolla. La evolución del hombre ha estado moldeada y dirigida por las fuerzas de la naturaleza. En los últimos millones de años hemos tenido que sobrevivir a muchas grandes catástrofes. aunque las mismas no dejan de constituir una muestra poco representativa de todos los cataclismos que

han ocurrido en la Tierra desde su formación. es decir. durante un lapso de tiempo 1.500 veces mayor que el tiempo total que el hombre lleva sobre este planeta. Nuestros conocimientos acerca de los procesos ocurridos en el lejano pasado de la Tierra proceden de la interpretación de las sutiles y a menudo circunstanciales pruebas registradas en las rocas. La interpretación de estas informaciones geológicas es a menudo controvertida: en realidad. hace tan sólo unos 100 años que este tipo de interpretaciones han sido totalmente aceptadas. Los geólogos de hoy en día pueden descifrar la historia de la Tierra y hacerse una idea del carácter y la magnitud de los procesos evolutivos. convulsiones. colisiones y desastres del pasado lejano gracias a este "registro de las rocas". tal y como lo denominó el primer geólogo moderno. un científico de Edimburgo llamado James Hutton, a comienzos del siglo XVIII. Sin embargo. las informaciones acerca del pasado de la Tierra contenidas en las rocas son muy incompletas. y lo son tanto más cuanto más retrocedemos en el tiempo.

Hutton (1726-97) analizó cuidadosa y desapasionadamente las informaciones existentes en las rocas de los alrededores de Edimburgo y de otros lugares que visitó, y llegó a la conclusión de que, en el caso de persistir a lo largo de grandes períodos de tiempo. los procesos geológicos que cambian lentamente la faz de la Tierra en la actualidad (meteorización. lluvia. hielo y viento como causantes de la erosión del suelo; la acumulación de nuevas capas de sedimentos en los lagos y mares; el vulcanismo y las restantes fuerzas del interior de la Tierra que provocan el alzamiento de nuevas tierras que después serán destruidas por la erosión) son suficientes. por sí solos. para explicar la antigua historia de la Tierra tal y como ha quedado registrada en las rocas más accesibles de la corteza terrestre. Observó que las rocas más antiguas que él estudió se habían podido formar a partir de procesos muy parecidos a los que podemos ver hoy en día. y llegó a la conclusión de que en el pasado la Tierra no pudo ser mucho más activa de lo que es en la actualidad. El concepto huttoniano de la Tierra implicaba una escala de tiempo inmensamente grande: arguyó que "no existían trazas del comienzo ni indicios del final" de los tiempos geológicos. Su conclusión "el presente es la clave del pasado" y especialmente las implicaciones que la misma conlleva acerca de la edad de la Tierra fueron furiosamente atacadas por muchos teólogos y científicos. Hasta comienzos del siglo XIX aún existían muchos naturalistas que creían que la Tierra había adquirido su actual aspecto en un período de tiempo muy corto. a través de unos pocos sucesos cataclísmicos repentinos. Pensaban. por ejemplo. que la excavación de los cañones. el relleno de los océanos y el levantamiento de las montañas se habían producido de una vez a través de inmensos procesos catastróficos. prácticamente instantáneos. Hutton. en cambio. pensaba que

la Tierra era una máquina regenerativa y que mientras unas fuerzas se encargaban de destruir las montañas y continentes, otras fuerzas estaban formando continuamente nuevas tierras y montañas al mismo tiempo para empezar de nuevo el ciclo.

Muchos científicos occidentales de los siglos XVII, XVIII y XIX, aunque influenciados por las ideas de los geólogos como Hutton, eran religiosos, y las implicaciones de los grandes períodos de tiempo durante los cuales se desarrollarían los procesos naturales abogados por los geólogos les creaban un grave conflicto, ya que lo que parecía deducirse de la atenta observación de la naturaleza contradecía lo que ellos leían en la Biblia. El fin de la concepción bíblica de la historia de la Tierra empezó con la publicación del libro "Principios de Geología" ("Principles of Geology") en 1830, cuyo autor era Sir Charles Lyell. Lyell (1797-1875) estaba convencido de que Hutton tenía razón. No veía nada de sobrenatural en los simples y lineales hechos de la geología, accesibles para cualquiera que viajase por el mundo con mentalidad abierta. El libro de Lyell reavivó en todo el mundo el interés por las teorías huttonianas y el impacto causado por sus persuasivos argumentos se vio reforzado con la publicación en 1859 del revolucionario tratado del naturalista inglés Charles Darwin sobre *El origen de las especies*. Es evidente que la teoría darwiniana acerca de la evolución implicaba un cambio progresivo, continuo e irreversible de la materia viva a partir de unos comienzos remotos y hacia un futuro aún muy lejano: la escala de tiempo de la evolución darwiniana, al igual que la correspondiente a la historia de la Tierra según Hutton, era enormemente extensa. En la segunda mitad del siglo XIX, los geólogos y los evolucionistas darwinianos empezaron a hablar en privado acerca de la historia de la Tierra en términos de miles de millones de años. Sin embargo, no tenían ningún sistema que les permitiese medir con precisión la duración de los tiempos pasados; únicamente podían formular toscas aproximaciones basadas en hechos tales como la acumulación gradual de sales en los océanos o el espesor total de sedimentos acumulados a lo largo de los tiempos geológicos.

En 1889, el concepto huttoniano/darwiniano de la Tierra sufrió lo que, a primer golpe de vista, parecía ser un serio revés. En dicho año, el más influyente físico de la época, igualmente escocés, lord Kelvin (1824-1907), publicó sus cálculos acerca de la edad de la Tierra basados en la estimación del tiempo necesario para que el planeta se enfriase desde un estado inicial aparentemente fundido hasta su estado actual, caracterizado por un flujo calórico superficial muy débil. Kelvin llegó a la conclusión de que las posibles diferencias en la edad de la Tierra debía situarse entre 200 y 20 millones de años, según la temperatura inicial de la Tierra. Por diversas razones, Kelvin consideró como más aproximada a la realidad la cifra menor, es

decir, 20 millones de años. La escala de tiempo de Kelvin, basada en los aparentemente inatacables principios de la física, era excesivamente corta para los geólogos y los evolucionistas. ¿Estaban equivocados Hutton, Lyell, Darwin y sus seguidores? En muchos laboratorios cundió el júbilo. Por fortuna, esta embarazosa diferencia de opiniones pudo ser resuelta rápidamente.

El científico francés Henri Becquerel había descubierto la radiactividad en 1896. Sus amigos, el matrimonio Curie, se le unieron en posteriores investigaciones acerca de esa misteriosa radiación que él había descubierto asociada con el uranio: a comienzos del siglo XX, los trabajos de los Curie y del inglés R. J. Strutt (más tarde Barón Rayleigh) demostraron que la natural desintegración espontánea de los elementos radiactivos contenidos en las rocas de la Tierra constituía una enorme fuente adicional de calor que Kelvin no había tenido en cuenta en sus cálculos. Los alquimistas medievales gastaban inútilmente sus vidas intentando convertir los metales básicos en oro: Becquerel y los Curie demostraron la existencia de la transmutación natural de los elementos. Aunque no producía oro, esa incesante transmutación sí producía algo que después adquiriría gran importancia en los esfuerzos del hombre para abastecerse de energía. El neozelandés lord Rutherford, director del laboratorio de Cavendish, en la Universidad de Cambridge, fue el primero en sugerir que aquella propiedad recién descubierta de la desintegración radiactiva de algunos elementos podía utilizarse para medir la edad de los minerales y rocas; eso ocurrió en el curso de una conferencia pronunciada en Yale el año 1905. El americano B. B. Boltwood siguió inmediatamente la sugerencia de Rutherford; Boltwood demostró que era realmente posible averiguar la edad de rocas de edades diferentes a partir de sus minerales portadores de uranio, hasta un lapso de tiempo de 1.600 millones de años. Había nacido la geocronometría, la ciencia que se ocupa de la medición del tiempo geológico.

El calor interno es la causa principal de la actividad de la Tierra. Actualmente sabemos que aunque parte de ese calor puede ser original (calor retenido por la nube de gas a partir de la cual se formó la Tierra), la mayor parte del mismo procede directamente de la radiactividad emitida por algunos elementos. La espontánea desintegración radiactiva del uranio, el torio, el potasio, el aluminio y otros elementos, más la desintegración de los actualmente escasísimos elementos transuránidos con períodos de desintegración pequeños en los primeros tiempos (comparados con las edades geológicas de la Tierra), constituye una fuente de calor continua, cuya disminución gradual es prácticamente imperceptible. La Tierra es una gran central nuclear: sin el calor radiactivo sería un planeta muerto. El vulcanismo observado en Marte, Venus, Mercurio y la Luna prueba que en esos

planetas también existe un calor interno de características similares, pero en ninguno de ellos esa fuente interna de energía es lo bastante importante como para proporcionarles la gran movilidad típica de la Tierra. La Tierra ha sido comparada con una máquina térmica en equilibrio inestable. Durante largos períodos de tiempo, el escape del calor interno a través de los volcanes parece bastar para mantener a la Tierra en un estado próximo al equilibrio estable, pero este estado se ve alterado frecuentemente por importantes variaciones cíclicas, de período largo y corto, en el suministro de calor. Cuando la cantidad de energía interna acumulada supera a la que está siendo liberada, se produce una aceleración de la actividad volcánica y sísmica. Los continentes se fragmentan y vuelven a unirse, las erupciones volcánicas son más frecuentes, se forman nuevas cuencas oceánicas mientras que otras desaparecen, se levantan cordilleras, nacen fosas oceánicas y se forma nueva corteza continental en la que se mezclan fragmentos de corteza antigua retrabajada, sedimentos metamorfizados y rocas volcánicas, todo ello distribuido a lo largo de cinturones móviles que bordean o cruzan los núcleos continentales más antiguos, los cratones. Pero mientras se construyen y levantan nuevas montañas y continentes, la erosión prosigue su acción destruyendo y nivelando el relieve hasta que éste alcanza el nivel del mar.

¿Cómo descifran los geólogos el registro fósil de las rocas? Para ello es necesario saber cómo se forman las rocas y qué representa cada una de ellas.

Las minas y los sondeos más profundos no son más que agujeritos insignificantes en la superficie de nuestro planeta. La combinación de las informaciones procedentes de las medidas de flujo calórico, de los estudios sismológicos, de las observaciones astronómicas y de los datos proporcionados por los sensores remotos (instrumentos y cámaras fotográficas especiales transportados por los satélites artificiales) nos permiten afirmar que la Tierra tiene un núcleo "caliente", mayormente fluido, rico en hierro y níquel, cuyo diámetro es de 6.945 km. Este denso núcleo metálico está rodeado por una gruesa envoltura rocosa, o manto, de 2.840 km, rico en sílice, hierro, magnesio, oxígeno, calcio y todos los elementos restantes en proporciones menores. Únicamente podemos examinar la parte superior del manto en algunos lugares excepcionales —uno de ellos son los remotos islotes de St. Paul's Rocks, en el Atlántico Sur—, ya que prácticamente en todo el mundo está recubierto por la "delgada" corteza de la Tierra. La corteza suele tener un espesor comprendido entre 5 y 60 km. Alcanza los máximos espesores debajo de las grandes cadenas montañosas, mientras que debajo de los océanos es en varios órdenes de magnitud más delgada que debajo de los continentes. La parte más superficial de la corteza está

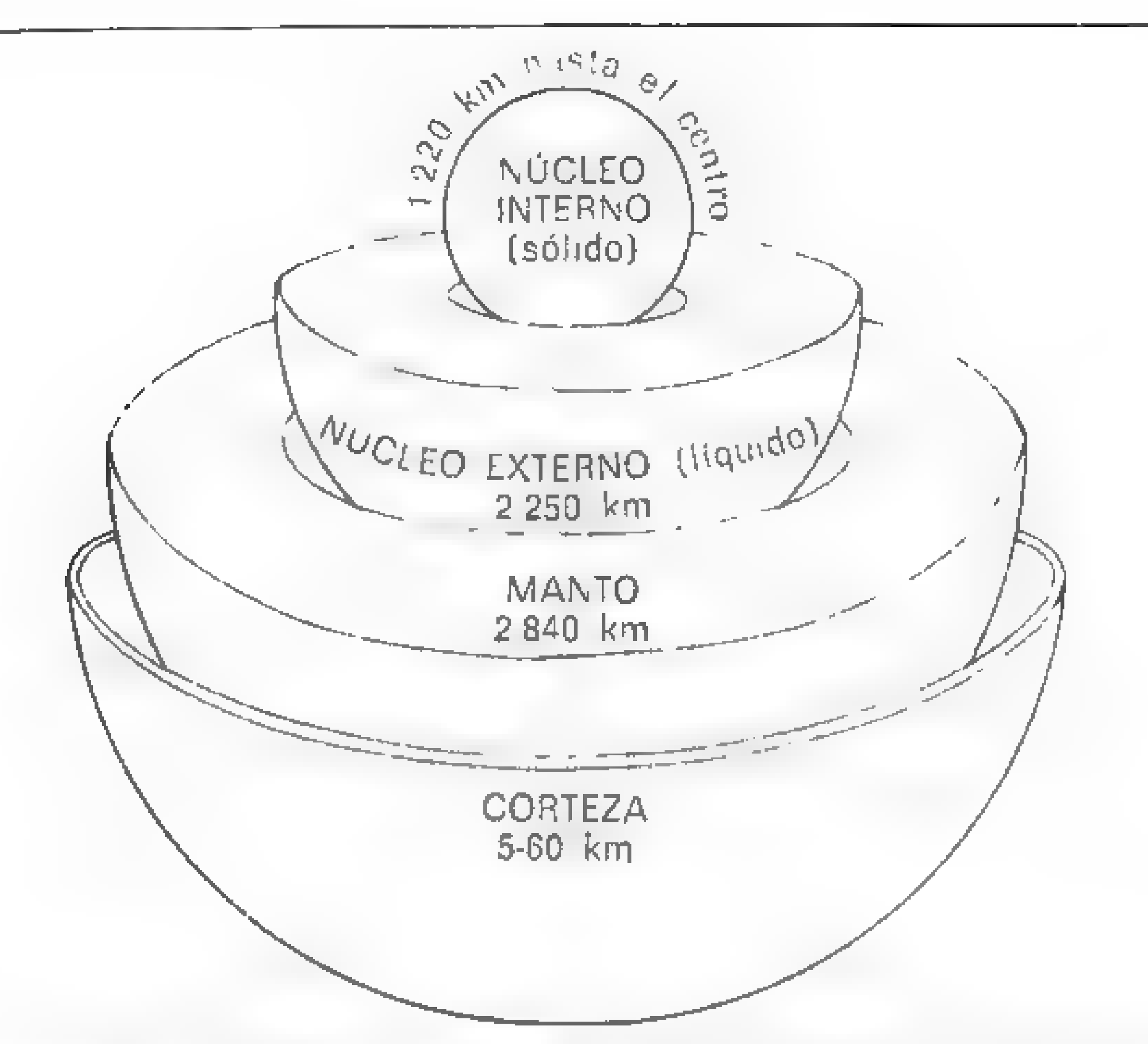


Fig. 3. Anatomía de la Tierra: la Tierra está básicamente constituida por una serie de envolturas concéntricas que recuerdan mucho en su estructura a la de una cebolla. La corteza es la envoltura más externa; consta de dos capas: la corteza continental, de composición granítica y rica en sílice y aluminio, conocida como el sial, y la corteza oceánica, de composición basáltica y rica en sílice y magnesio, conocida como el sima. Sus densidades respectivas son 2,7 g/cm³ para el sial, la capa más externa, y 2,9 g/cm³ para el sima, la capa más interna de las dos; este último constituye los fondos oceánicos.

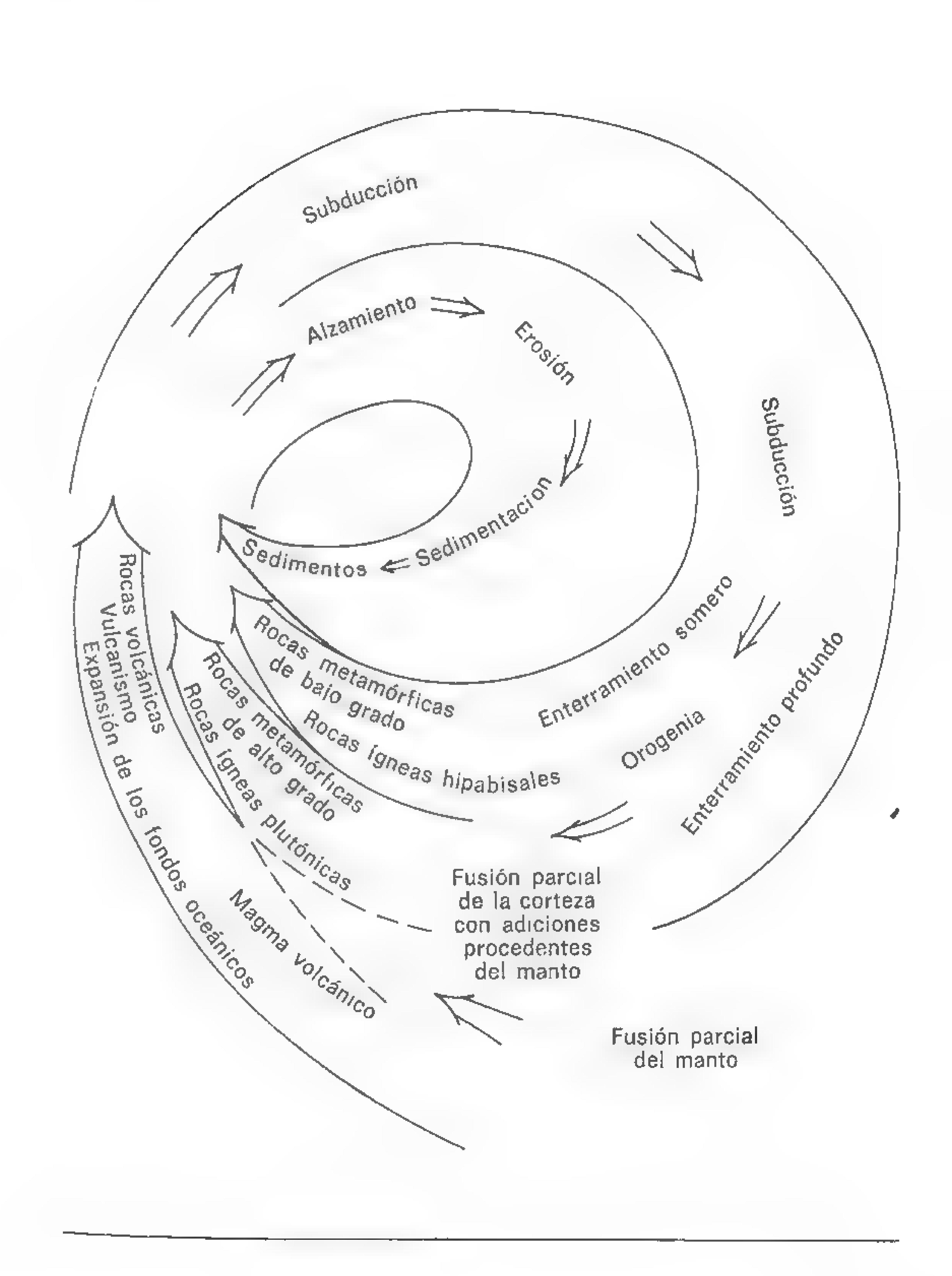
El manto es la siguiente envoltura; está separado de la corteza por la discontinuidad de Mohorovičić, a partir de la cual la densidad de las rocas aumenta rápidamente, pasando de 2,9 a 3,3 g/cm³. El manto está compuesto por peridotita, una roca densa cuyos constituyentes esenciales son el hierro y el magnesio; más cerca de la parte exterior del manto existe una capa plástica denominada astenosfera o zona de baja velocidad; al atravesar esa zona, las ondas sísmicas ven sensiblemente disminuida su velocidad; en dicha zona la peridotita está próxima a su punto de fusión. La denominada litosfera está compuesta por la corteza más la parte del manto situada por encima de la zona de baja velocidad. En el manto inferior la densidad aumenta desde 4,3 a 5,5 g/cm³ debido a las mayores presiones y al mayor empaquetamiento de los átomos.

El núcleo está separado del manto por la discontinuidad de Gutenburg, la cual comporta un cambio de densidades desde 5,5 hasta 10 g/cm³. En el núcleo externo ciertos tipos de ondas sísmicas no pueden transmitirse; esto sugiere que él mismo se halla en un estado plástico-líquido. Otros tipos de ondas sísmicas atraviesan lentamente el núcleo externo liquido y, a continuación, aumentan su velocidad al alcanzar el núcleo central (densidad 13,6 g/cm³), por lo que éste debe hallarse en estado sólido; probablemente, su composición es parecida a la de algunos meteoritos ricos en hierro-níquel.

compuesta a menudo por finas capas de sedimentos, lava y tobas depositadas por el viento, las aguas, el hielo o la actividad volcánica. Debajo de las capas vulcano-sedimentarias planas, los continentes están constituidos por rocas plegadas y alteradas por el calor, a menudo invadidas por cuerpos de rocas cristalinas previamente fundidas y después enfriadas. La corteza continental tiene una composición de conjunto próximo a la del *granito;* debajo de los océanos, la corteza tiene una composición media más próxima a la del *basalto.* La base de la corteza presenta una brusca discontinuidad —llamada *moho*, del nombre de su descubridor, un científico servio apellidado Mohorovičić— a través de la cual se produce un rápido incremento en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. El manto superior, que se extiende unos 725 km por debajo de la discontinuidad, tiene una composición próxima a la de la *peridotita*, y es de esa parte de la Tierra de dónde proceden la mayoría de lavas y dónde se originan la mayor parte de los terremotos. Por tanto, el estudio de esta importante zona tiene un gran interés para los científicos. (Cuando el Congreso estadounidense canceló el Proyecto Mohole —nombre en clave de un intento de perforar la corteza oceánica hasta alcanzar el manto superior, para así poder examinarlo—, en agosto de 1966, una enorme desilusión se apoderó de muchos científicos y se hicieron comparaciones desfavorables con las enormes sumas de dinero que se estaban gastando en la carrera espacial.)

Hay tres grandes categorías de rocas: *ígneas, sedimentarias y metamórficas*, según la composición de las mismas. Las rocas ígneas son agregados minerales producidos por la cristalización relativamente lenta de rocas fundidas mientras se enfrían. En muy pocos casos, cuando el enfriamiento es extremadamente rápido se forman vidrios naturales (p. ej., la obsidiana).

Fig. 4. El ciclo de las rocas muestra las interrelaciones entre las rocas ígneas, ▶ metamórficas y sedimentarias. Los principales procesos que intervienen en él son el vulcanismo y los alzamientos que dan lugar a la formación de nuevas áreas emergidas, la erosión de esas áreas y la sedimentación subsiguiente que forma nuevas rocas sedimentarias, el enterramiento profundo y la formación de montañas que convierten todas las rocas preexistentes en rocas metamórficas, y la fusión parcial a grandes profundidades que provoca la aparición de masas de rocas fundidas (llamadas *magma*) que eventualmente pueden ascender hacia niveles más superficiales y consolidarse como nuevas rocas ígneas. El ciclo de las rocas ha estado operando en continuo desde los primeros tiempos de la historia de la Tierra. La actividad principal del ciclo de las rocas continentales se desarrolla por completo dentro de la corteza, cuyo volumen ha aumentado considerablemente a lo largo de los tiempos geológicos debido a la adición de masas parcialmente fundidas y de otros fluidos procedentes del manto. La corteza oceánica más pesada, principalmente de origen volcánico y recubierta por una fina película de sedimentos de aguas más profundas, se recicla normalmente dentro del manto



Las rocas fundidas pueden enfriarse y consolidarse como cuerpos *intrusivos* en el interior de la Tierra (como los batolitos graníticos, los diques de dolerita, etc.); o bien pueden perforar la superficie (rocas *extrusivas*) en forma de flujos de lava o producirse erupciones explosivas como cenizas, aglomerados y brechas volcánicas.

La meteorización rompe las rocas de superficie (meteorización física) y facilita su disolución (meteorización química). Los fragmentos resultantes de la erosión son transportados por el viento, el agua y el hielo y se acumulan en lugares deprimidos y en los mares, lagos y océanos del mundo en forma de capas de sedimentos. Algunas rocas *sedimentarias* (denominadas clásticas) están enteramente constituidas por fragmentos resultantes de la erosión (p. ej., algunas areniscas y pizarras); otras están compuestas por fragmentos resultantes de la erosión cementados por precipitación de los materiales disueltos en las aguas; otras tienen un origen exclusivamente químico (algunas calizas, la sal); y otras son especialmente ricas en precipitados de origen orgánico o inorgánico (p. ej., el carbón, el coral, algunas calizas).

El enterramiento profundo de las rocas provoca en ellas cambios mineralógicos graduales que responden a los incrementos de presión y temperatura a que van siendo sometidas. En los cinturones montañosos, este enterramiento puede ir acompañado por deformaciones intensas, pliegues y fallas: las rocas alteradas de esa manera reciben el nombre de rocas *metamórficas* (p. ej., el gneis, los esquistos, el mármol, la corneana, algunas pizarras).

La observación de las características distintivas de las rocas en su emplazamiento natural permite a un geólogo entrenado deducir cómo se han formado. El estudio de las rocas en proceso de formación —en las erupciones volcánicas modernas, en los ríos, lagos, mares y océanos modernos, y también en procesos simulados mediante experimentos de laboratorio— ha puesto de manifiesto las características peculiares de varios procesos de formación diferentes. La presencia de las mismas características en rocas antiguas significa que muy probablemente esas rocas se han formado de manera similar

A título ilustrativo vamos a examinar algunas de las características de las dunas de arena (eólicas) de las actuales áreas desérticas tropicales. Cada duna tiene un talud plano y extenso cara al viento, con una cresta que le separa de un talud más abrupto, menos extenso y ligeramente cóncavo situado a sotavento. El fuerte viento hace ascender a los granos de arena por el talud de barlovento y éstos, una vez han alcanzado la cresta de la duna, caen por el talud de sotavento, cuya pendiente es equivalente al ángulo natural de reposo de la arena seca —unos 30° a 35°—. A medida

que va soplando el viento, se van formando en el talud de sotavento nuevas capitas de arena que son recubiertas por otras capitas cada vez más jóvenes. Este proceso de erosión en la cara de barlovento y de deposición en la cara de sotavento conlleva el avance hacia delante de los barjanes y las dunas transversales. Si hiciésemos un corte transversal de una duna, desde un extremo a otro de la misma, veríamos una secuencia de finas líneas inclinadas, ligeramente cóncavas, que no son otra cosa sino los planos de estratificación de la duna: cada línea representaría una capita de granos de arena depositados más o menos simultáneamente. En la parte de sotavento, cada plano de estratificación representa una antigua superficie de la duna, que ha sido recubierta por superficies sucesivas más recientes a medida que la duna iba avanzando lentamente. Cuando se les examina con un microscopio o una lupa de gran aumento, puede verse que muchos de los granos que constituyen la duna presentan unas superficies pulimentadas muy características debidas a la persistente acción abrasiva de los propios granos de arena transportados por el viento en los ambientes desérticos. En las regiones de los desiertos relativamente protegidas del viento, se forman grandes acumulaciones de dunas, superponiéndose unas sobre otras, dando lugar a una complicada estratificación cruzada que se descubre cuando se cava en ellas. En las partes más profundas de los modernos apilamientos de dunas es frecuente ver un cemento rojo de óxidos de hierro, silícico y/o calcáreo, precipitado a partir de las aguas del subsuelo; este cemento constituye un revestimiento o película que recubre las superficies de los granos y rellena las cavidades intergranulares. Los estudios comparativos de la for-

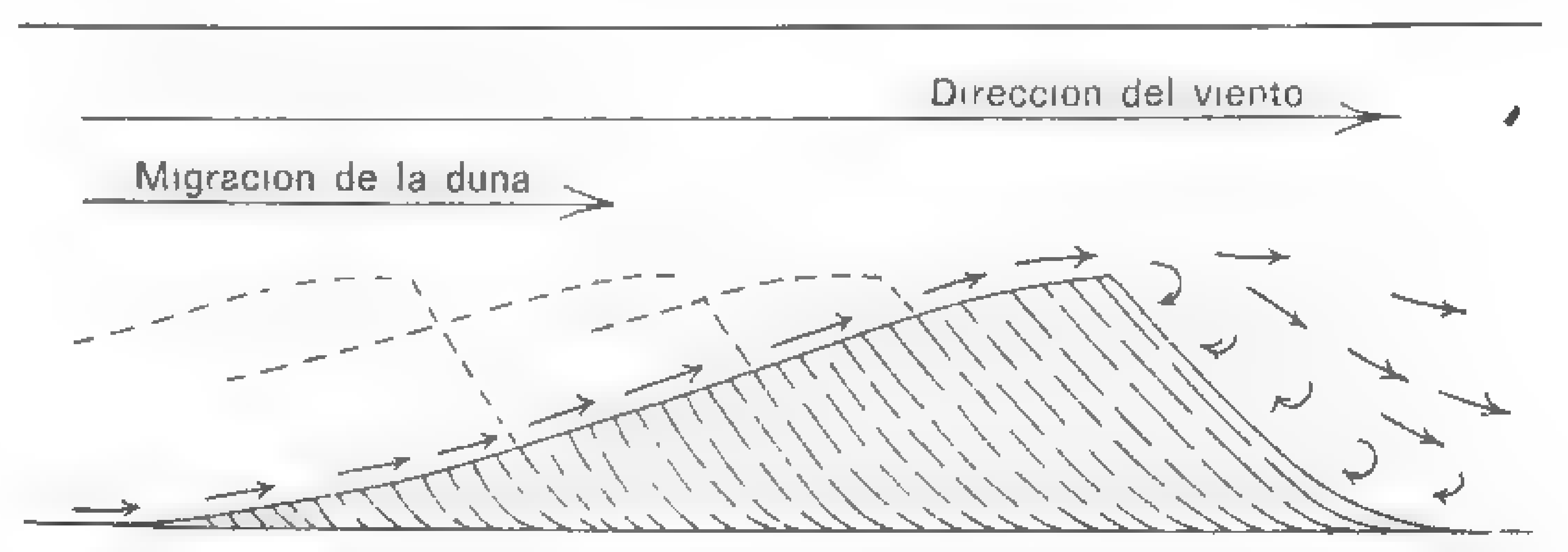


Fig. 5. Corte transversal de una duna de arena de origen eólico: la duna migra hacia delante siguiendo la dirección del viento; la migración comporta la erosión de la vertiente de barlovento, cuyos granos de arena son empujados hasta la cresta de la duna, desde donde caen hacia la vertiente de sotavento, en la que se van acumulando en capas cuya pendiente es igual al ángulo de reposo de la arena.

mación de las dunas en muchos desiertos modernos ha permitido a los geólogos comprender las características distintivas de las rocas antiguas que se formaron de esa misma manera.

En los Midlands ingleses, en los alrededores de ciudades como Kidderminster y Bridgnorth, en donde el clima actual es templado y marítimo, existen muchas carreteras abiertas en una roca roja cuya edad se estima en unos 230 millones de años. Examinándola de cerca, puede verse que esta roca es una arenisca en la que hay muchos granos de arena pulimentados por la acción eólica y parcialmente revestidos y cementados por óxidos de hierro, calcita y calcedonia. Además, en muchos afloramientos de estas rocas se observa que sus planos de estratificación tienen exactamente la misma disposición en capas ligeramente curvas lo mismo que las de las modernas dunas. Por tanto, y aplicando la sentencia de Hutton que dice que "el presente es la clave del pasado", podemos llegar a la conclusión de que la roca roja de los Midlands ingleses representa un antiguo complejo dunar que se acumuló hace unos 230 millones de años en un desierto tropical. Esta deducción nos dice muchas cosas acerca de la historia geológica de Gran Bretaña. No hay duda de que en aquella época los Midlands ingleses formaban parte de un gran continente situado en las proximidades del ecuador, ni de que la geografía de Inglaterra estaba dominada por grandes desiertos intramontanos, parecidos en muchos sentidos a los actuales desiertos, en los que se desarrollan grandes complejos dunares. Hacia el este de Inglaterra, las rocas depositadas en este antiguo desierto se pueden detectar a través del Mar del Norte hasta alcanzar Alemania, Polonia y Rusia. En América se las encuentra desde Nueva York hasta Texas. Sabemos que hace 230 millones de años el océano Atlántico no existía. Desde Texas hasta Rusia, y a la altura del Trópico de Cáncer, existía un amplio cinturón desértico que se extendía a lo largo de lo que por aquel entonces era un único y gran continente. En aquellos tiempos, un viaje desde los Midlands ingleses hasta Nueva York habría sido algo parecido a cruzar el actual desierto del Sahara desde Khartoum hasta Tombuctú.

Procediendo de forma análoga al ejemplo que acabamos de citar, los modernos y detallados estudios sobre el vulcanismo, el metamorfismo, la sedimentación, la formación de montañas y los restantes procesos geológicos nos dan la clave para interpretar y comprender las numerosas y a veces leves, pero siempre características, claves del pasado geológico de la Tierra. De este modo, los científicos son capaces de leer en las rocas, interpretando cómo se formaron y llegando incluso, a veces, a predecir los acontecimientos geológicos del futuro.

Las "claves" existentes en las rocas son muchas y muy diversas. Pueden consistir, por ejemplo, en moldes fosilizados de los impactos de gotas de lluvia, grietas de desecación, planos de estratificación debidos a corrientes, galerías de gusanos, huellas de animales, moldes de pisadas, huevos, defecaciones, acantilados marinos, playas de chinas, arrecifes de coral, tubos de lava, meandros fluviales o incluso verdaderas montañas fósiles enterradas durante millones de años debajo de capas de rocas más recientes. A una escala menor, el estilo de los pliegues y la orientación de las juntas, fallas y planos de esquistosidad en los cortes de las rocas pueden permitir llegar a importantes conclusiones acerca de los eventos que se sucedieron en la construcción de una determinada cadena montañosa. En las rocas hay otras muchas evidencias que pueden ser de utilidad: pequeñas variaciones en su composición, las interrelaciones entre los componentes minerales tales como se pueden ver al microscopio, la composición de los minerales tardíos que rellenan las venas de la roca, las poblaciones de plantas y animales microscópicos incluidas en las rocas, etc. Los geólogos experimentados hurgan en esas claves y las utilizan para interpretar y comprender las sucesiones de ambientes pretéritos de manera parecida a como efectuaba sus pesquisas el famoso héroe novelesco creado por Conan Doyle, Sherlock Holmes. La satisfacción intelectual que proporciona una interpretación geológica correcta puede ser tan grande como la que se obtiene de la resolución de un intrincado y laberíntico caso criminal.

Cuando ya se es capaz de interpretar correctamente las claves contenidas en las rocas, es necesario dar un segundo paso. Hay que aprender a integrar las evidencias procedentes de diferentes afloramientos rocosos, para así reconstruir la única secuencia histórica verdadera. La ciencia que se ocupa de la historia secuencial de la Tierra se llama la estratigrafía. Se considera que el constructor de canales William Smith es el "padre de la estratigrafía" puesto que fue él, en el siglo XVIII, el primero que comprendió claramente que la sucesión de distintas capas rocosas representaba otras tantas páginas de la historia geológica local. Llegó a esta conclusión gracias a las observaciones efectuadas a lo largo de una travesía por Inglaterra de este a oeste desde Bristol hasta Londres; se dio cuenta de que rocas sedimentarias distintas contenían distintas asociaciones de restos de moluscos fósiles, plantas, peces u otros animales. En regiones como el oriente de Inglaterra, en las que la secuencia de rocas sedimentarias tan sólo presenta una ligera inclinación hacia la cuenca del Mar del Norte, es evidente que las páginas de historia geológica en ella contenidas deben ser leídas de abajo hacia arriba, es decir, desde las capas inferiores hacia las superiores. Esta regla tan simple recibe el nombre de "Ley de la Superposición": normalmente, las rocas más jóvenes se depositan encima de las más antiguas.

Sin embargo, la historia de una determinada región de la Tierra puede ser mucho más complicada que la del oriente inglés. La simple superposi-

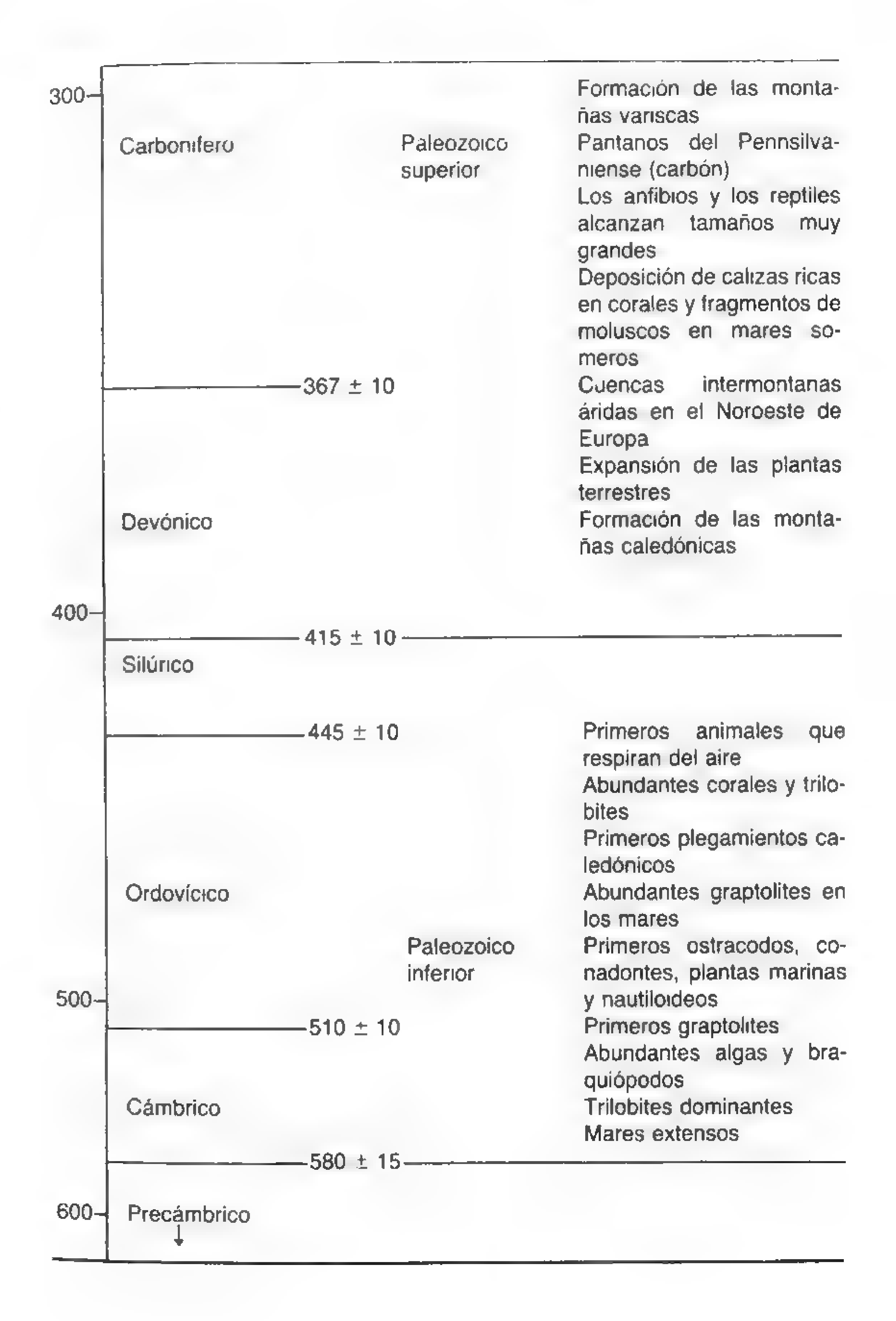
ción de capas de rocas sedimentarias puede verse interrumpida por fenómenos tales como el vulcanismo, los alzamientos, la subsidencia, los plegamientos, las fallas y el metamorfismo. Cuando después de un período tranquilo caracterizado por la lenta acumulación de importantes paquetes sedimentarios se produce una fase de alzamiento y plegamiento (construcción de montañas), no sólo habrá una brusca interrupción del registro histórico grabado en las rocas, sino que la deformación y el metamorfismo pueden obliterar o destruir parcialmente la historia previamente conservada. En algunos episodios orogénicos pueden producirse inversiones de las series sedimentarias o incluso apilamientos de bloques deslizados que darán como resultado secuencias cronológicas profundamente perturbadas. Para descifrar la historia de esas regiones especialmente complicadas es necesario efectuar mucho trabajo de campo. Normalmente, el único registro que nos queda de los períodos de alzamiento, digamos de una parte de un continente o una cordillera montañosa, son superficies de erosión que truncan las capas rocosas más antiguas, y sobre las cuales se depositarán los sedimentos posteriores al alzamiento. Estas importantes interrupciones del registro geológico se denominan "disconformidades". Algunas disconformidades representan intervalos enormes de tiempo geológico, cuyo registro ha sido irremediablemente perdido en la región concernida. Para poder estudiar correctamente la secuencia geológica y la historia de una región, es necesario confeccionar el mapa geológico de la misma. Los mapas geológicos son básicos para evaluar los recursos minerales de una región, y desde que Henry de la Beche fundó el Servicio Geológico de la Gran Bretaña en 1835, prácticamente todos los países del mundo han instalado oficinas similares encargadas de confeccionar los correspondientes mapas geológicos. Actualmente, los servicios geológicos de los EE.UU., Rusia y China emplean, cada uno de ellos, a miles de geólogos.

Para reconstruir la historia geológica de la Tierra es necesario juntar en ecuación y colocar en el orden correcto una cantidad enormemente grande de secuencias fragmentarias que reflejan los acontecimientos del pasado. Dichas secuencias se elaboran a partir de la cartografía y del estudio de las sucesiones locales de rocas a lo largo y ancho de todo el mundo. Un primer requisito imprescindible para llevar a cabo este proceso es la capacidad de datar las rocas para así poder correlacionar los acontecimientos registrados en áreas actualmente muy alejadas entre sí. En las rocas relativamente jóvenes, es decir, en las que tienen menos de 600 millones de años, el registro fósil de la evolución de la vida sobre la Tierra marca una sucesión de hitos que facilitan enormemente la comparación entre diferentes rocas. Cuando encontramos rocas con restos de dinosaurios, sabemos que esas rocas son más antiguas que las que contienen restos de homínidos. Análogamente, sabemos que, con una sola excepción, los invertebrados fósiles llamados "trilobites" sólo se encuentran en rocas cuyas edades están comprendidas entre 600 y 365 millones de años antes de la actualidad. Sin embargo, no todos los fósiles son característicos de un determinado período de tiempo ("time-diagnostic"): la "lingula", por ejemplo, es un pequeño marisco cornudo que prácticamente ha permanecido sin evolucionar desde hace 580 millones de años. Cuanto mayor es el área geográfica que ocupaba y cuanto menor es el lapso de tiempo geológico durante el cual vivió, mayor es el valor estratigráfico de una especie fósil. Algunas especies de foraminíferos planctónicos fósiles han cumplido ambas condiciones a la perfección: así, el estudio de las poblaciones de foraminíferos fósiles presentes en las rocas que se extraen al perforar los pozos petrolíferos tiene un enorme interés aplicado, ya que gracias a esos estudios se pueden correlacionar diferentes niveles estratigráficos entre pozos a menudo muy distantes.

Los geólogos del siglo XIX clasificaron ordenadamente las secuencias sedimentarias acumuladas en varias partes del continente europeo a lo largo de los últimos 580 millones de años: cada una de las divisiones resultantes de tal clasificación recibió un nombre derivado del de la localidad en que se estudiaron por primera vez las rocas de esa edad. Así, por ejemplo, las tres divisiones más antiguas de la clasificación reciben los nombres de Cámbrico, Ordovícico y Silúrico, procedentes de los nombres de otras tantas tribus que poblaban Gales en los tiempos pre-romanos; el Pérmico recibió su nombre del de la ciudad de Perm (Molotov), en los Urales; las montañas del Jura, al noroeste de los Alpes, dieron su nombre al Jurásico. La tabla 2-1 muestra las principales divisiones de la escala de los tiempos geológicos. Desde sus orígenes en Inglaterra, América del Norte y Europa, la estratigrafía se extendió rápidamente a través del resto del mundo. Sin embargo, la correlación mediante fósiles no es aplicable en todos los casos; este tipo de correlación no puede ser utilizado, por ejemplo, en las rocas del Precámbrico (las que tienen más de 600 millones de años de antigüedad). Considerando que el Precámbrico engloba las siete octavas partes de la historia geológica de la Tierra, es fácil darse cuenta del gravísimo inconveniente que esto representaba. El "buceo" hacia la historia más primitiva de la Tierra no fue, pues, posible hasta el advenimiento de la datación radiométrica de las rocas. Sin embargo, a finales de la década de los 50 ya se había realizado un volumen considerable de dataciones radiométricas: éstas permitieron calibrar la escala de tiempo que va desde el Cámbrico hasta la actualidad y que hasta aquel entonces estaba basada únicamente en el registro fósil. También se pudo calcular la edad absoluta de la Tierra y se pudieron datar y correlacionar a escala global los principales eventos geológicos precámbricos de nuestro planeta

Tabla 2-1. La escala de los tiempos geológicos

M.A.	Período	Límite	Era	Acontecimientos
0	Cuaternario ~ 1.8 M.A. Neógeno			Ultima edad de hielo Evolución del hombre
		24 + 1	Cenozoico	Formación de los Alpes las montañas Rocosas y el Himalaya
	Paleógeno			Deriva continental en progresión Edad de los mamíferos
		67 ± 1		
100	Cretácico			Extinción de los reptiles gigantes Desaparición de los ammonites Formación de las montañas larámides Mares de Creta en Europa
		137 ± 5		Las plantas con flores se expanden con rapidez
	Jurásico		Mesozoico	Extensos mares someros invaden los continentes Edad de los dinosaurios Coladas basálticas en África y Sudamérica
200		210 + 10		Ambiente continental árido en el interior de Gondwana
	Triásico			
		237 ± 10		
	Pérmico			Primeros mamíferos Formación de los Appalaches
		285 ± 10		Edad de hielo en el hemisferio sur



M.A.	Período	Límite	Era	Acontecimientos
300	Carbonífero		Paleozoico superior	Formación de las montañas variscas Pantanos del Pennsilvaniense (carbón) Los anfibios y los reptiles alcanzan tamaños muy grandes Deposición de calizas ricas en corales y fragmentos de moluscos en mares someros
		367 ± 10		Cuencas intermontanas áridas en el Noroeste de Europa Expansión de las plantas terrestres
	Devónico			Formación de las montañas caledónicas
400		415 ± 10		
	Silúrico			
		445 ± 10		Primeros animales que respiran del aire Abundantes corales y trilobites Primeros plegamientos caledónicos
	Ordovícico		Paleozoico inferior	Abundantes graptolites en los mares Primeros ostracodos, conadontes, plantas marinas y nautiloideos
500		510 ± 10		Primeros graptolites
	Cámbrico			Abundantes algas y braquiópodos Trilobites dominantes Mares extensos
		580 ± 15		
600	Precámbrico ↓			

¿Cómo se calcula actualmente la edad de las rocas? Tal y como ya hemos visto, los geólogos del siglo XIX desarrollaron las técnicas y acumularon la experiencia necesaria para ordenar correctamente las rocas según su edad relativa. Una vez fue llevada a cabo esta ordenación en gran parte de la Tierra, el estudio de los procesos de formación de las rocas permitió la formulación de hipótesis científicas acerca de las correlaciones entre diferentes continentes y acerca de la cantidad de tiempo necesaria para que pudiese desarrollarse la historia geológica de la Tierra. Sin embargo, la medición de la edad absoluta de las rocas en años no fue posible sino hasta los comienzos del siglo XX, y ello en gran medida gracias a los trabajos de Arthur Holmes, Profesor Emérito de Geología en la Universidad de Edimburgo. El nombre de Holmes suele asociarse con el acertado uso creciente de la desintegración radiactiva de los elementos para datar las rocas y confeccionar una escala precisa de los tiempos geológicos. Para datar las rocas y sus constituyentes minerales, los científicos de nuestros días pueden utilizar varios "relojes radiométricos", puesto que así se les denomina. El principio de estos relojes radica en la desintegración radiactiva espontánea de los isótopos de ciertos elementos (nuclidios padre) presentes en las rocas y minerales; esta desintegración transmuta los nuclidios padre en isótopos de otros elementos (nuclidios hijo).

Actualmente está generalmente aceptado que la Tierra tiene 4.600 millones de años de antigüedad. Esta conclusión se basa en varias líneas de evidencia que se refuerzan mutuamente:

1. Las rocas terrestres más antiguas que se conocen hasta ahora son una secuencia de lavas y sedimentos metamorfizados aflorantes cerca de Godhaab, al oeste de Groenlandia, en un lugar denominado Isua. Su datación radiométrica indica que las mismas se acumularon hace unos 3.800 millones de años. La presencia de rocas sedimentarias clásticas vulgares en esta antiquísima secuencia confirma la preexistencia de una primitiva corteza que sustentaba tierras emergidas y océanos en los que ya tenían lugar los procesos geológicos de precipitación, meteorización y erosión. Por tanto, la Tierra en sí debe tener bastante más que 3.800 millones de años de antigüedad.

2. La determinación de las edades de los meteoritos ha proporcionado cifras próximas a los 4.600 millones de años. Puede considerarse que los meteoritos son fragmentos formados o abandonados en el estadio inicial de evolución de los planetas.

3. Las rocas lunares más antiguas muestreadas hasta la fecha demuestran tener una edad de 4.600 millones de años.

Tabla 2-2. Principales métodos de datación radioisotopica

Metodo	Vida media* del isotopo radio-isotopico	Rango de datacion efectivo	Materiales que pueden ser datados
Uranio-plomo Torio-plomo $^{238}U/^{206}Pb$ $^{235}U/^{207}Pb$ $^{232}Th/^{208}Pb$ ($^{207}Pb/^{206}Pb$)	$4{\cdot}51 \times 10^9$ años $0{\cdot}71 \times 10^9$ años $13{\cdot}9 \times 10^9$ años	Desde 10×10^6 años hasta la edad de la Tierra	Circón, uraninita, pechblenda, monacita (algunas rocas macizas)
Potasio-argón $^{40}K/^{40}Ar$ (dos métodos: desgasificación total y análisis espectral del $^{40}Ar/^{39}Ar$)	$1{\cdot}31 \times 10^9$ años	Desde 10^5 años hasta la edad de la Tierra	Cualquier mineral o roca portadora de potasio
Rubidio-estroncio $^{87}Rb/^{87}Sr$ (dos métodos: edad de los minerales y análisis isocrónico)	$48{\cdot}5 \times 10^9$ años	Desde 10×10^6 años hasta la edad de la Tierra	Minerales ricos en rubidio o rocas tales como la moscovita, la microclina, la biotita, el granito-gneis, etc
^{14}C	5.730 ± 30 años	0-40.000 años	Madera, carbonilla, turba, semillas, tejidos, huesos carboneados, ropas, conchas, tobas, aguas subterráneas
Trazas de fisión del ^{238}U	Tasa de fisión espontánea aprox. 10^{16} años	Desde 6 meses hasta la edad de la Tierra	Vidrio, apatita, esfena, circón, epidota, alanita, hornblenda, granate, piroxenos, feldespatos, micas, etc

* La vida media de un radioisótopo es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de una cantidad dada del isótopo. Está relacionada con la constante de desintegración, λ, mediante la fórmula:

$$\text{vida media} = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

4. Los isótopos del plomo ^{206}Pb, ^{207}Pb y ^{208}Pb son productos finales de la serie de desintegración radiactiva del uranio-torio. Teniendo en cuenta la evolución gradual de los isótopos del plomo con el tiempo, puede calcularse la edad del sistema Tierra-Luna-meteoritos. Estos cálculos proporcionan asimismo una edad de 4.600 millones de años.

Tal y como ya dijimos a comienzos del capítulo, 4.600 millones de años es un lapso de tiempo enormemente grande en comparación con la escala humana del tiempo. Con el fin de hacer que la historia de la Tierra sea más fácilmente comprensible, vamos a suponer que cada lapso de 1.000 millones de años es un *día-Tierra*. Según esta escala imaginaria, actualmente estamos en el quinto día de vida de la Tierra: ¡cuatro días, catorce horas y veinticuatro minutos desde el momento de su nacimiento! Las rocas más antiguas, las de Isua, al oeste de Groenlandia, se formaron alrededor de las 19.12 horas del primer día-Tierra. Durante el día-Tierra segundo, sin duda ya había formas de vida en los primitivos océanos, pero la gran explosión evolutiva, responsable de la actual diversidad de formas de vida, no empezó hasta después de la medianoche del cuarto día-Tierra. Los días del uno al cuarto representan los tiempos precámbricos, cuyo registro está contenido en las rocas cristalinas predominantemente azoicas de los basamentos continentales. A primeras horas del quinto día-Tierra, la vida en los océanos proliferó y se diversificó. Al alba, empezó la colonización de la tierra firme: los yacimientos de carbón del Carbonífero superior (Pennsylvaniense) de Europa y Norteamérica son los restos de los grandes bosques de helechos arbóreos y otras plantas pantanosas que poblaban las regiones deltaicas de los continentes del hemisferio norte alrededor de las 7 horas de la mañana. Los grandes reptiles, los dinosaurios, se enseñorearon de la Tierra en el transcurso de la mañana del día quinto, y se extinguieron un poco antes de las 13 horas. A primeras horas de la tarde del día-Tierra quinto (entre las 13 horas y la hora actual, las 14.24) se ha producido la gran expansión de las aves y los mamíferos. El hombre primitivo hizo su aparición alrededor de las 14.17 horas. Nuestra propia especie (*Homo sapiens*) ¡hace tan sólo 7,2 segundos que está en la Tierra!

En ningún otro lugar del mundo mejor que en el Gran Cañón del Colorado puede el hombre darse cuenta de su insignificancia (lámina 6). Desde el llamado Mirador del Cañón o "Canyon View", en el límite meridional del mismo, puede contemplarse estupendamente esa extraordinaria incisión en la corteza exterior de la Tierra. Esta enorme garganta, cuya anchura oscila entre 7 y 32 kilómetros, ha sido excavada por el Río Colorado a lo largo de los últimos 10 millones de años (o sea, en los últimos 15 minutos del quinto día-Tierra), a medida que esa parte de América iba levantándose lentamente. ¡El Cañón es lo bastante grande como para que en él pudiese ser sepultada toda la raza humana! La sección geológica aflorante abarca más de 2.000 millones de años (dos días-Tierra), es decir, casi la mitad de la historia de la Tierra.

El río Colorado circula por el lecho interno, o garganta de granito, del Gran Cañón. Las paredes de la garganta de granito muestran una importante secuencia de lavas, tobas y areniscas cuyas características son similares a las de las rocas que se forman en los cinturones móviles de la Tierra a partir de los cuales nacen los grandes sistemas montañosos. Antes de ser intensamente plegadas, metamorfizadas y penetradas por grandes volúmenes de granito fundido (durante un antiguo e importante evento orogénico que tuvo lugar a finales del tercer día-Tierra), como mínimo 7.600 metros de esas rocas volcánicas y sedimentarias se acumularon en el actual emplazamiento del Gran Cañón. Durante muchos millones de años, las montañas resultantes de tal orogenia constituyeron un importante elemento orográfico en el continente del que por aquel entonces formaban parte. Existen evidencias de que posteriormente se sucedieron varias fases de rejuvenecimiento del cinturón primitivo, acompañadas por intrusiones de granito y diques de dolerita. Sin embargo, a la postre la erosión convirtió toda la región en una auténtica penillanura. Para ello fue necesario erosionar y transportar toneladas y toneladas de rocas, cuyos fragmentos se redepositaron en cuencas sedimentarias, marinas y continentales más recientes.

A finales del Precámbrico (la tarde del cuarto día-Tierra), el mar retrocedió, dejando en la región ocupada por el actual Gran Cañón un paquete sedimentario de 3.700 metros de espesor. Una importante disconformidad separa estas rocas (denominadas "Series en Cuña") del basamento cristalino infrayacente; tal disconformidad representa el intervalo de tiempo durante el cual el alzamiento y la erosión fueron los procesos geológicos dominantes en esa parte de la Tierra. Las series en cuña están compuestas por areniscas, conglomerados, arcillas y calizas. Buena parte de la sucesión tiene un color rojo o bermellón característico; algunas calizas presentan estructuras que han sido interpretadas como restos de antiguos arrecifes algales creados por la actividad de esas plantas primitivas. Un poco más tarde (antes de la medianoche del día-Tierra cuarto), la región volvió a ser levantada durante otro período orogénico. La parte superior de la corteza se rompió y se produjeron importantes deslizamientos a lo largo de grandes fallas. Los movimientos a lo largo de los planos de falla debieron causar un número muy elevado de terremotos, algunos de los cuales probablemente revistieron características catastróficas. Inevitablemente, tan pronto como estuvieron formados esos gigantescos bloques basculados limitados por fallas, la erosión empezó a nivelarlos (alrededor de la medianoche del día-

Tierra cuarto), convirtiendo de nuevo a la región en otra penillanura. El proceso de peneplanización no sólo afectó a las series en cuña, sino que en algunos lugares incluso alcanzó el basamento cristalino infrayacente, provocando el afloramiento del mismo. Por tanto, las series en cuña únicamente han quedado preservadas hasta nuestros días bajo forma de bloques fallados y basculados en cuña contra el basamento cristalino, decapitados en sus partes frontales por la segunda disconformidad.

En el Gran Cañón, la gran disconformidad que limita por arriba con las series en cuña marca el fin del Precámbrico. Sobre dicha disconformidad reposan varios cientos de metros de rocas en disposición horizontal que representan la historia del quinto día-Tierra, nuestro día. Hasta el borde del Cañón, hay unos 1.200 metros de esas rocas. La parte de la historia de la Tierra registrada en esos 1.200 metros de sedimentos halla su continuación en los 3.000 metros de sedimentos de los escarpes del norte de Utah. Todas estas rocas han sido ligeramente arqueadas a través de la plataforma de Colorado. En los primeros momentos del quinto día-Tierra, la superficie peneplanizada del continente precámbrico sufrió un lento proceso de hundimiento que la situó por debajo del nivel del mar. La acción de las olas cámbricas en avance contribuyó a conformar la superficie de disconformidad tal y como la vemos hoy en día. A medida que la profundidad del mar iba en aumento, la deposición inicial de gravas y arenas dominantes dejó paso a una sedimentación caracterizada por partículas muy finas, de tamaño limo y arcilla, siendo las calizas el sedimento dominante. Estas capas sedimentarias son ricas en trilobites, unos artrópodos fósiles que fueron hallados por primera vez en las rocas cámbricas de Gales, por lo que se conoce esa época como la era Cámbrica.

En el Gran Cañón no hay rocas representativas del resto del Paleozoico inferior. Es probable que la región estuviese próxima al nivel del mar durante unos 100 millones de años (períodos Ordovícico y Silúrico, entre las 2.24 y las 4.45 horas del quinto día-Tierra) y que, por tal motivo, la deposición de sedimentos pertenecientes a esos sistemas fuese muy escasa o nula. El siguiente evento consistió en un ligero alzamiento respecto al nivel del mar. La erosión que siguió a dicho alzamiento arrasó cualquier posible vestigio de rocas ordovícicas y silúricas que, eventualmente, se hubiesen depositado: además, entalló valles fluviales en las rocas cámbricas infrayacentes. Las calizas y areniscas fluviales de este período contienen restos fósiles de los primeros peces acorazados de agua dulce y de otros animales, todos ellos característicos de los tiempos devónicos o, simplemente, del Devónico. Las rocas con restos de peces sólo se hallan en unas capas lenticulares, delgadas y discontinuas, situadas debajo de un potente resalte calizo teñido de rojo, la "Pared de Caliza Roja", de unos 230 metros

de espesor. La caliza roja forma una llamativa cornisa continua muy característica, situada a media vertiente del Cañón.

La caliza roja es una caliza marina muy pura y rica en restos de muy diversos organismos marinos. Dicha caliza nos dice que aproximadamente al alba del quinto día-Tierra, la región del Gran Cañón fue invadida por el océano del Carbonífero inferior (Mississippiense). A finales del Carbonífero (alrededor de las 7.15 horas), las aguas se retiraron y en las tierras recién emergidas se instauró un ambiente desértico. Las pizarras de esta edad contienen pistas animales, élitros y restos de helechos fósiles. Por encima se sitúan los abruptos escarpes de una caliza eólica blanquecina, el coconino, con estratificación cruzada muy compleja y sin fósiles, aunque rica en pistas animales. Es evidente que esas rocas de finales del Carbonífero y del Pérmico fueron depositadas en un ambiente desértico por cursos fluviales efímeros y en lagunas temporales sometidas a desecaciones periódicas: las areniscas blancas constituyen un complejo dunar fosilizado. A finales del Pérmico (cerca de las 8.15 horas del quinto día-Tierra), la región empezó a ser invadida una vez más por el mar. Al principio, la línea de costa no estaba estabilizada, era fluctuante, pero los sedimentos del Pérmico más alto, aflorantes en los bordes del Cañón, están formados por una caliza marina rica en restos de moluscos, corales y dientes de tiburón. Dicha caliza de Kaibab, fini-pérmica, marca el fin de la era Paleozoica (la era de la vida primitiva) en el Gran Cañón (eran las 8.53 horas del quinto día-Tierra).

La prosecución de la historia del quinto día-Tierra puede ser seguida con mayor facilidad en el norte de Utah, en las montañas de Red Buttey Cedar, en el Desierto Pintado y en la región del Cañón de Zion. A partir del estudio de las rocas existentes en esa región, se llega a la conclusión de que a comienzos de la era Mesozoica (la era intermedia, en que había vida abundante sobre la Tierra) el mar volvió a retirarse y Arizona y Utah se convirtieron una vez más en regiones desérticas, integradas en un gran continente semiárido. En algunos lugares, los conglomerados rojos, las areniscas y las arcillitas del Triásico contienen abundantes restos vegetales fósiles. En los depósitos fluviales de comienzos del Jurásico (alrededor de las 8.40 horas) se encuentran huellas de dinosaurios. Pero la más impresionante formación rocosa de edad jurásica son las Areniscas de Navajo, que alcanzan los 300 metros de espesor y forman el escape de los White Cliffs, en Utah, las paredes del Lago Powell, cerca de la presa del Cañón de Glen, las paredes del Cañón de Escalante y el Domo de la Montaña Navajo, en el norte de Arizona. Los acantilados de Vermilion Cliffs y White Cliffs, al noroeste del Navajo Point, en el Gran Cañón, excavados todos ellos en las Areniscas de Navajo, han sido llamados, no sin razón, "acantilados de dunas fósiles". Al oeste del sector del Gran Cañón, el ambiente continental

semiárido persistió a lo largo de todo el Mesozoico hasta finales del Cretácico, hace unos 67 millones de años (o sea, entre las 8.53 y las 12.45 horas, aproximadamente, del quinto día-Tierra). Más hacia el este, en Colorado y Nuevo México, imperaron durante aquel tiempo las condiciones marinas. En la zona de transición, el mar avanzó y retrocedió varias veces, razón por la cual el registro sedimentario del Cretácico está formado por alternancias de sedimentos marinos ricos en moluscos y otros fósiles, depósitos de carbón indicadores de la existencia de llanuras y pantanos costeros con una vegetación exuberante (y que constituían el hábitat de numerosos grandes dinosaurios), y conglomerados, areniscas y arcillas de origen fluvial depositadas por los ríos que drenaban las tierras altas situadas más al oeste. Cerca de las 12.45 horas del quinto día-Tierra acabó la "edad de los dinosaurios" y comenzó la "edad de los mamíferos". La región del Gran Cañón ha estado situada por encima del nivel del mar durante toda la era Cenozoica (la era de la vida moderna o reciente). El registro acumulado en las rocas es pobre; sin embargo, incluye los gruesos depósitos lacustres del Cañón de Bryce y las coladas de lava de las Montañas de San Francisco. Gran parte de la historia cenozoica de la región del Gran Cañón es una historia de erosión: se formaron grandes escarpes y cerros testigo, se nivelaron extensas penillanuras, y posteriormente se excavó el Gran Cañón del Colorado. Hoy en día, a las 14.24 horas del quinto día-Tierra, el Gran Cañón es una de las principales maravillas naturales del mundo, pero es, por supuesto, efímero en términos geológicos. En el futuro geológico, la erosión se encargará pronto de arrasar las actuales tierras altas de Arizona y Utah e, inevitablemente, en las próximas horas-Tierra toda la región se convertirá en una penillanura que, con el paso del tiempo geológico, volverá a hundirse bajo las aguas, siguiendo incesantemente el mismo ciclo que ya siguió en el pasado.

Este repaso de la historia geológica de la región del Gran Cañón, en el norte de Arizona y sur de Utah, nos muestra que durante una gran parte de su pasado dicha región no habría podido ser habitada por el hombre. Hace 2 millones de años era una profunda cuenca oceánica; a partir del relleno de esa cuenca se formó un cinturón montañoso de considerables proporciones. Esas montañas desprovistas de vegetación no habrían sido más habitables de lo que la Luna lo es en la actualidad; los episodios de rejuvenecimiento a que se vieron sometidas estuvieron sin duda acompañados por algunos terremotos catastróficos y manifestaciones volcánicas. A finales del Precámbrico, el océano volvió a inundar la región y, después de un breve período de levantamiento y fracturación, volvió a invadirla: tal situación se mantuvo probablemente a lo largo de todo el Paleozoico inferior. En el Devónico la región estaba emergida y en ella imperaba un clima semiári-

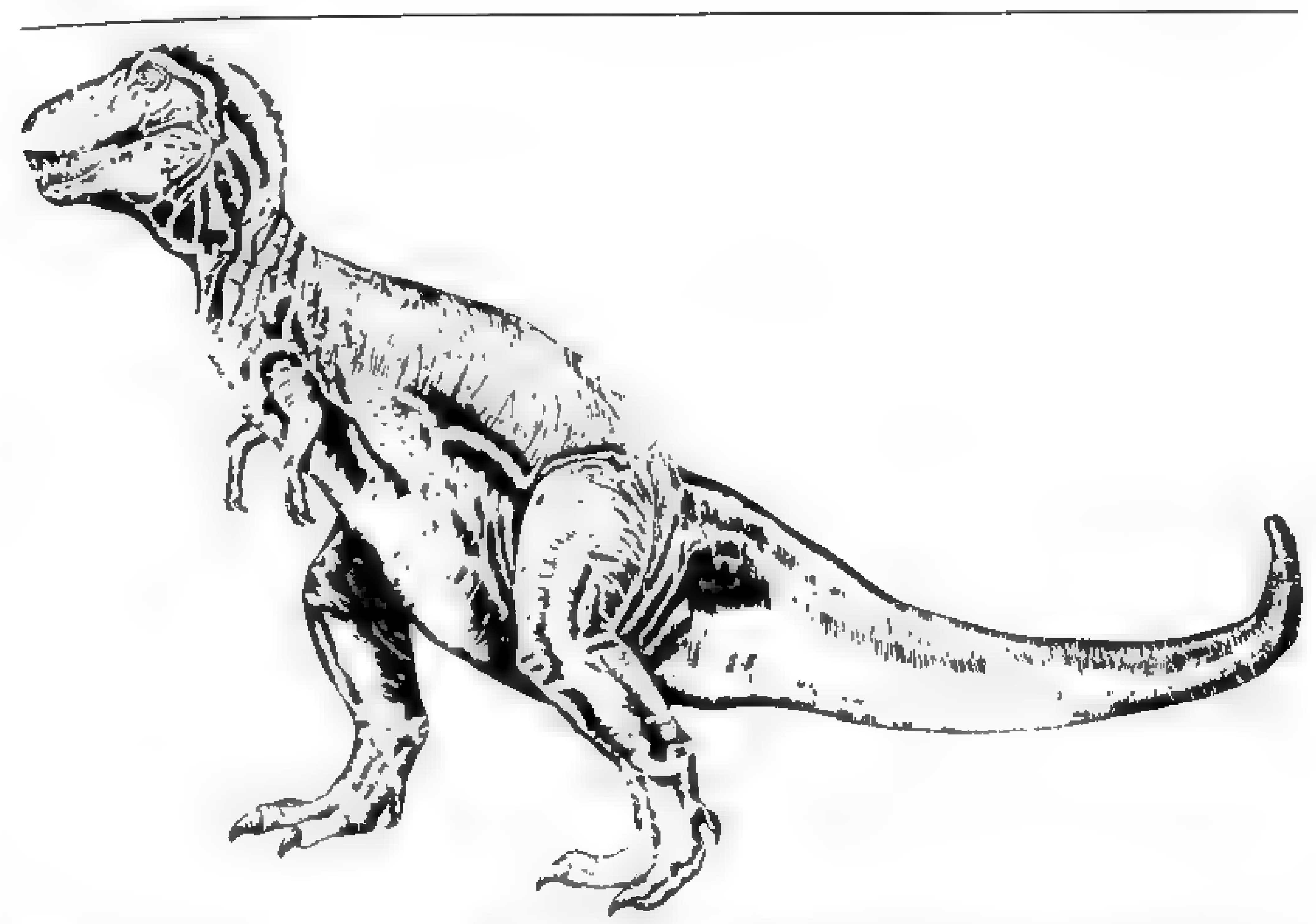


Fig. 6. *Tyrannosaurus rex*, el mayor de los dinosaurios carnívoros conocidos; este monstruo de desplazamiento rápido medía unos 18 metros de la cabeza a la cola y poseía unos mortíferos dientes de más de 16 cm. Debió de ser de espantosas consecuencias para cualquier criatura tan endeble como el hombre.

do; había ríos y lagos, ricos en peces. Si el hombre hubiese podido adaptarse al bajo contenido en oxígeno de la atmósfera primitiva, tal vez hubiese podido vivir en la región durante ese período. Pero muy pronto, en el Carbonífero inferior, el mar volvió a invadir la tierra firme. Después se produjo un alzamiento y, durante un largo período, la región del Gran Cañón formó parte de un vasto desierto en el que quizás también habría podido vivir el hombre, sometido, no obstante, a una vida nómada impuesta por las condiciones meteorológicas imperantes. En varias ocasiones estas tierras fueron cubiertas por las aguas, para volver a emerger posteriormente. Sin embargo, en determinados momentos, la vida vegetal y animal fue muy abundante en las llanuras costeras, hecho que probablemente hubiera podido aprovechar el hombre para satisfacer sus necesidades. No obstante, hubiera tenido que protegerse de los grandes dinosaurios, los cuales eran en aquellos tiempos mucho más numerosos en las fértiles llanuras costeras que en el resto de las zonas. Desde los inicios del Cenozoico, hace 67 millones de años, el hombre probablemente hubiese podido vivir satisfac-

toriamente en la región del Gran Cañón durante la mayor parte del tiempo. Esporádicamente, la región habría sido excesivamente árida, y en otros momentos sometida a devastadoras manifestaciones volcánicas, pero durante la mayor parte del tiempo las condiciones ambientales no habrían diferido mucho de las actuales. Respecto al futuro geológico, una cosa es segura: el océano volverá a invadir Utah y Arizona más de una vez, expulsando de la región a los hombres y animales domésticos que eventualmente aún puedan vivir en ella.

En las páginas precedentes hemos repasado sucintamente el desarrollo de la ciencia de la geología. Hemos visto que los geólogos pueden datar las rocas valiéndose de la desintegración radiactiva de ciertos elementos contenidos en las mismas. Hemos visto de qué manera pueden interpretar la sucesión de ambientes pasados registrados en las rocas. Hemos aprendido que la Tierra tiene 4.600 millones de años de antigüedad y nos hemos adentrado en algunos aspectos de la historia de Arizona y Utah durante la segunda mitad de la vida de la Tierra. Todo ello nos ha permitido comprender cómo un geólogo experimentado puede "leer en el registro de las rocas" y examinar el pasado en busca de evidencias de los eventos que han determinado la historia de la Tierra, eventos que si se repitiesen ahora o en el futuro serían catastróficos para la civilización del hombre. Así pues, este breve y superficial repaso de la historia de la Tierra tal como está registrado en las rocas de la corteza terrestre nos ha mostrado que la misma ha estado caracterizada por una sucesión interminable de acontecimientos potencialmente catastróficos.

En los primeros momentos de la historia de la Tierra, ésta habría sido un protoplaneta formado por una masa de rocas, polvo y gas orbitando alrededor del Sol en una primitiva nebulosa solar. La atracción gravitatoria ejercida por dicha masa sobre cuerpos y partículas menores provocaría la incorporación de las mismas a la proto-Tierra, que, de este modo, iría aumentando incesantemente su volumen como una bola de nieve gigantesca. A medida que el protoplaneta crecía en tamaño y se iba contrayendo debido a las fuerzas gravitatorias, su temperatura interna se habría incrementado lo bastante como para provocar la fusión parcial, la segregación gravitacional y la desgasificación volcánica de sus componentes sólidos. Muchos de los gases inicialmente incorporados por el protoplaneta o liberados hacia la atmósfera por los diversos procesos de desgasificación habrían sido rápidamente barridos por el viento solar. La atmósfera primitiva debió consistir en una mezcla irrespirable de hidrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno. Durante los estadios posteriores del crecimiento inicial, las capas superficiales del protoplaneta debieron estar bombardeadas

continuamente por pequeñas condensaciones de la primitiva nebulosa solar que no llegaron a convertirse en planetas individuales. La caída de estos microplanetas, o *planetesimales*, según la denominación del geólogo americano Chamberlin, habría convertido la superficie de la Tierra en una especie de desierto polvoriento plagado de cráteres; incluso es posible que el calor liberado por los impactos hubiese provocado la fusión generalizada de las capas superficiales. No sabemos cuánto tiempo duró este primer capítulo de la historia de la Tierra. Los cálculos oscilan entre 100 años y 100 millones de años. Sin embargo, lo que sí es cierto es que una vez finalizado este violento período de bombardeo incesante, explosiones, fusión y vulcanismo, únicamente una pequeña parte del vapor de agua liberado en la atmósfera a través de las nubes de gases volcánicos pudo empezar a condensarse y a formar mares temporales que llegarían a constituir los primitivos océanos. Evidentemente, el hombre no podría sobrevivir en un planeta en este estadio de desarrollo. La incesante lluvia de planetesimales y meteoritos fue aún muy importante durante los primeros 580 millones de años de vida del planeta: probablemente entre 1.000 y 10.000 veces mayor que la tasa actual de bombardeo que sufren las rocas terrestres.

Hace unos 4.000 millones de años, mientras la tasa de formación de cráteres iba disminuyendo rápidamente, el vulcanismo se convirtió en uno de los rasgos dominantes de la Tierra. Es probable que en los primeros momentos de vida de la Tierra, ésta recibiese algunos impactos tan enormes como los que dieron lugar a la formación de los mares lunares; también es probable que los cráteres gigantes, de hasta 4.000 kilómetros de diámetro, resultantes de tales impactos fuesen rellenados por coladas de basaltos y otros tipos de lavas aún más ricas en magnesio y hierro. En la Luna, estos cráteres gigantes primitivos son aún claramente visibles. No obstante, la identificación de los mismos en la Tierra es extremadamente difícil debido, por un lado, a la constante movilidad de la corteza terrestre y, por otro lado, a los procesos de erosión y enterramiento de las rocas más antiguas de la Tierra por otras más jóvenes. Dentro de los bloques continentales más antiguos existen profundos surcos de rocas vulcano-sedimentarias altamente metamorfizadas. Recientemente, se ha sugerido que algunos de estos surcos representan en realidad el relleno de antiguos cráteres; dicho relleno habría sido plegado y metamorfizado durante ulteriores episodios de movilidad cortical.

Los océanos y la atmósfera de la Tierra son esencialmente un subproducto del vulcanismo. La formación de los océanos debe ser situada en el período comprendido entre 4.000 y 3.000 millones de años (aún dominado por el vulcanismo y el bombardeo extraterrestre generalizados), período en que, por tanto, también quedó definitivamente establecida la separación de

tierras y mares. Sin embargo, debido a su pobre contenido en oxígeno, la atmósfera aún debía ser irrespirable. De todos modos, incluso prescindiendo de este importante hecho, el incesante bombardeo cósmico y el vulcanismo generalizado harían imposible la supervivencia de la especie humana. La corteza continental era muy delgada en esos tiempos arcaicos; por eso se rompía y era inyectada por grandes volúmenes de granito líquido con mayor facilidad y frecuencia, respectivamente, que en ningún otro momento de su historia posterior. Se fragmentaba por todas partes a la vez que era inyectada por grandes cuñas de basalto líquido (los actuales complejos de diques de dolerita) procedente de la fusión parcial del manto superior. Estos complejos de diques a menudo alimentaban grandes conos volcánicos a través de los cuales la lava llegaba a la superficie.

Durante el período comprendido entre 3.000 y 2.000 millones de años antes de la actualidad, la frecuencia del bombardeo cósmico sobre la superficie de la Tierra disminuyó sensiblemente (la tasa de formación de cráteres no era en promedio mayor que unas cinco veces la tasa actual). Los continentes y océanos estaban plenamente formados e individualizados. Las primitivas formas de vida empezaron a proliferar en los océanos. En la primera mitad de este período se formaron grandes cinturones montañosos en todos los continentes; esta fase de formación de montañas estuvo acompañada por la deformación y el plegamiento generalizados de rocas más antiguas, terremotos, vulcanismo, metamorfismo e intrusiones graníticas. La erosión de esas regiones montañosas determinó el relleno sedimentario de numerosas cuencas intermontanas y de las cuencas marinas. La segunda mitad de este período estuvo caracterizada por la formación de nuevos complejos de diques de dolerita y por grandes intrusiones de un tipo de roca peculiar *(anortosita)*, también conocida en la Luna en el mismo período.

Ya hemos examinado con cierto detalle la segunda mitad de la historia de la Tierra, tal y como está registrada en las rocas del Gran Cañón. A partir de estas y de otras evidencias observadas en otras partes del mundo, sabemos que poco después de 2.000 millones de años atrás se produjo otro período de plegamientos y formación de montañas que levantaron grandes cinturones en todos los continentes. De nuevo, tan pronto como estuvieron formadas estas montañas empezaron a ser erosionadas. Este ciclo de formación de montañas y nivelamiento subsiguiente por la erosión se repitió dos veces más, a escala global, en la historia de la Tierra (hace unos 1.000 y 500 millones de años, respectivamente). Localmente, se han producido otros muchos episodios de formación de montañas, u *orogénicos*, de menor importancia que los que se produjeron en otras épocas a lo largo de la historia de la Tierra.

En las rocas precámbricas existen muchos indicios de grandes cataclismos. Cada una de las grandes fallas que desplaza las rocas corticales debe haber ocasionado numerosos terremotos mientras estuvo activa. Las potentes capas de lavas, tobas e *ignimbritas* (materiales piroclásticos solidificados) presentes en las secuencias de esa época nos hablan de un violento y prolongado vulcanismo. El registro sedimentario refleja las numerosas transgresiones y regresiones oceánicas ocurridas en el interior de las tierras. La erosión repetida de las zonas montañosas a medida que se iban formando no hubiera sido posible si no se hubiese producido un número elevadísimo de tormentas, inundaciones, corrimientos de tierras, aludes y otros fenómenos semejantes. Además, existía el peligro constante del bombardeo extraterrestre, cuya tasa no se redujo al valor actual hasta hace unos 2.000 millones de años.

El mapa geológico del distrito de Johannesburgo, Sudáfrica, puede darnos una idea de las devastaciones causadas por las colisiones entre la Tierra y cuerpos del tamaño de los asteroides procedentes del espacio. Muchos geólogos opinan que las estructuras circulares visibles al norte y al sur de esa ciudad son cicatrices fósiles dejadas por varios impactos de planetesimales ocurridos hace unos 2.100 millones de años. Al sur de Johannesburgo, el anillo o círculo de Vredefort, de unos 80 kilómetros de diámetro, está rodeado por una amplia zona anular de perturbación cortical. Al norte existe un complejo de tres anillos superpuestos, cada uno de los cuales es más de dos veces mayor que el anillo de Vredefort, que constituyen la denominada estructura de Bushveld. En conjunto, el área afectada por los cuatro impactos queda delimitada por un triángulo equilátero de 480 kilómetros de lado. Hoy en día lo único que podemos examinar es la corteza deformada y las rocas resultantes de la solidificación de los materiales fundidos e intruidos hasta distancias a menudo considerables de los cráteres primitivos. La antigua superficie de la Tierra y los propios cráteres han sido intensamente afectados por la erosión desde el momento de su formación hasta nuestros días. Sin embargo, podemos imaginar lo tremendos que debieron ser los efectos de este múltiple impacto con la destrucción y hundimiento en la Tierra de toneladas y toneladas de fragmentos de roca que debieron quedar esparcidos en un radio de cientos de kilómetros. En el capítulo 7 desarrollaremos con detalle todos los aspectos relacionados con este catastrófico, pero afortunadamente escaso, tipo de riesgo geológico.

Ha sido únicamente en los últimos 1.000 millones de años cuando las condiciones ambientales terrestres se han aproximado a aquellas que son necesarias para el pleno desarrollo de la vida humana. De hecho, las condiciones idóneas para que la vida humana pudiese desarrollarse sobre nuestro planeta no se dieron hasta el Paleozoico superior, momento en que se

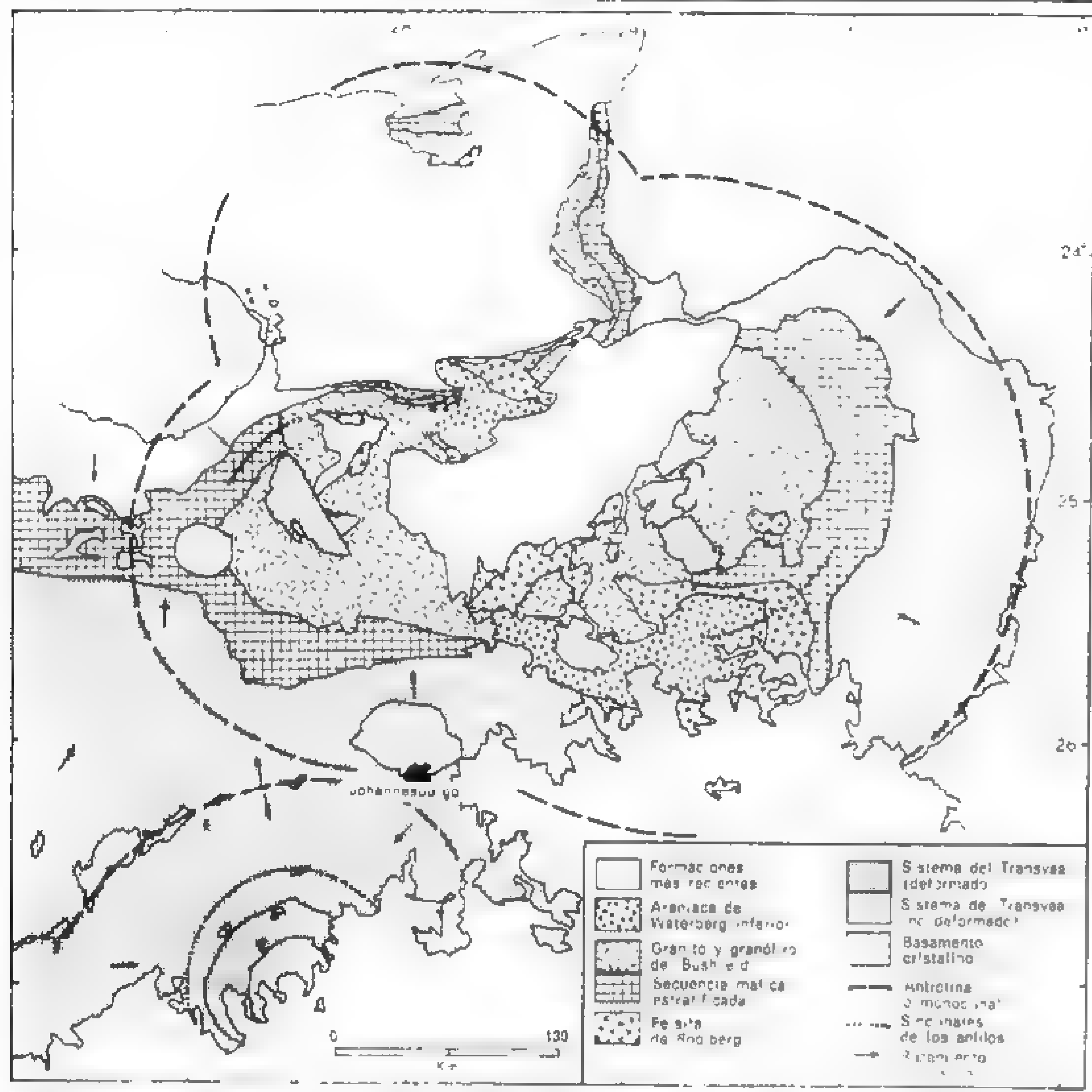


Fig. 7. Mapa geológico del distrito de Johannesburgo, Sudáfrica. El Domo de Vredefort y las estructuras del Bushveld han sido interpretados como las cicatrices de los impactos de cuatro grandes meteoritos del espacio hace unos 2.100 millones de años. Actualmente, los indicios de aquel evento sólo son visibles en rocas que por aquel entonces se hallaban bastante lejos de la superficie. Tanto los cráteres gigantes que debieron formarse como los fragmentos de roca que salieron despedidos como consecuencia de los impactos, y que cubrían en conjunto una superficie de miles de kilómetros, han estado sometidos permanentemente a los procesos erosivos que empezaron a actuar en el instante siguiente del que se produjeron los impactos

produjo la colonización generalizada de las tierras emergidas en condiciones en que la vida humana pudo ser algo placentera en nuestro planeta. Por tanto, el período de la historia de la Tierra que más nos interesa son los últimos 400 millones de años. Son precisamente los eventos y los desastres

acaecidos a lo largo de ese tiempo los que han ejercido mayor influencia sobre la situación actual del hombre y sobre su futuro. Sabemos que durante los primeros 100 millones de años, más o menos, de este período existía un único y enorme supercontinente, compuesto por varios fragmentos corticales soldados por cinturones montañosos. Después, desde hace unos 250 millones de años aproximadamente, la historia de la Tierra ha sido en gran medida la historia del desmembramiento de este supercontinente y del alejamiento relativo de las distintas piezas que lo componían. El mecanismo que rige todo el proceso de su formación y de su fragmentación posterior, el *baile de los continentes* o *deriva continental*, sólo ha sido comprendido por los científicos en tiempos relativamente recientes. Dicho mecanismo tiene una importancia fundamental para explicar el porqué de los terremotos, el vulcanismo, la formación de montañas y los cambios climáticos; por tal motivo, le dedicaremos todo un capítulo, el capítulo 3. El análisis detallado de los principales riesgos geológicos registrados en las rocas formadas a lo largo de los últimos 400 millones de años, y que son los mismos con que el hombre debe enfrentarse en la actualidad, confirma que éstos son los siguientes: terremotos, tsunamis, vulcanismo, cambios climáticos (que provocan el crecimiento o la reducción de las áreas de los casquetes de hielo y de los desiertos), los avances del mar sobre la tierra firme, y el bombardeo extraterrestre. En los próximos capítulos examinaremos con detalle cada uno de estos peligros potenciales

III. EL BAILE DE LOS CONTINENTES

Hasta que una voz, tan mala como la Conciencia,
llama en tonos infinitos
en una eterna repetición de murmullos
una y otra vez, día y noche:
"Hay algo oculto. Vé y hállalo, Vé y mira
detrás de las montañas";
"Algo perdido y que espera que tú vayas
¡Vé!"

Rudyard Kipling, *El Explorador*

El domingo, día 31 de mayo de 1971, el señor Mateo Casaverde, del Instituto Geofísico del Perú, y algunos amigos estaban visitando la ciudad de Yungay, en el propio Perú. Yungay está situada al pie del Nevado de Huascarán, una hermosa montaña de 6.655 metros de altura, cuya cima está cubierta por glaciares y nieves perpetuas. El cielo era azul y el tiempo era muy agradable. Cuando conducía por el pie de la colina en que está ubicado el cementerio de Yungay, el motor del coche del señor Casaverde empezó a ratear. Detuvo su vehículo y se puso a mirar el motor. Fue entonces cuando se dio cuenta de que se estaba produciendo un terremoto; naturalmente, el señor Casaverde aprovechó la ocasión para realizar observaciones de primera mano acerca del suceso. Vio como se hundían algunos pequeños edificios y un puente que cruzaba un riachuelo. Después de unos 40 segundos el terremoto se detuvo y los temblores cesaron. Bruscamente, llamó su atención un gran rugido procedente de la dirección en que se hallaba en Huascarán, en el que se había formado una enorme nube de polvo. Una gran masa de hielo y rocas se había desprendido de la vertiente

norte, cerca del glaciar 511, y estaba descendiendo a velocidad creciente hacia el estrecho valle en el que se encontraban Yungay y otros pueblos más pequeños. Rápidamente el señor Casaverde y sus amigos echaron a correr hacia la colina del cementerio, que era la zona alta más próxima, a unos 180 metros de distancia. Ya casi la habían alcanzado cuando la esposa de uno de los amigos del señor Casaverde tropezó y cayó. Mientras la ayudaba a ponerse de pie, el señor Casaverde no pudo evitar sentir un escalofrío al ver que casi tenían encima la avalancha de rocas, hielo y agua. Recuerda: "La superficie de la ola estaba curvada como si se tratase de una enorme ola marina rompiente; medía al menos 80 metros de alto. En Yungay, centenares de personas corrían alocadas, presas del pánico; algunos intentaban alcanzar la seguridad que ofrecía la colina del cementerio. El ensordecedor rugido era realmente terrorífico. Yo llegué a la cima de la colina justo a tiempo, en el momento en que la avalancha de derrubios chocó contra el pie de la misma. Tanto mis amigos como yo tuvimos que salvar nuestras propias vidas en tan sólo 10 segundos." El señor Casaverde vio como, en el pie de la colina, un hombre conseguía poner a salvo a dos niños que llevaba en brazos instantes antes de que la avalancha se le llevase para siempre; dos mujeres que se hallaban cerca de él también fueron arrastradas para siempre

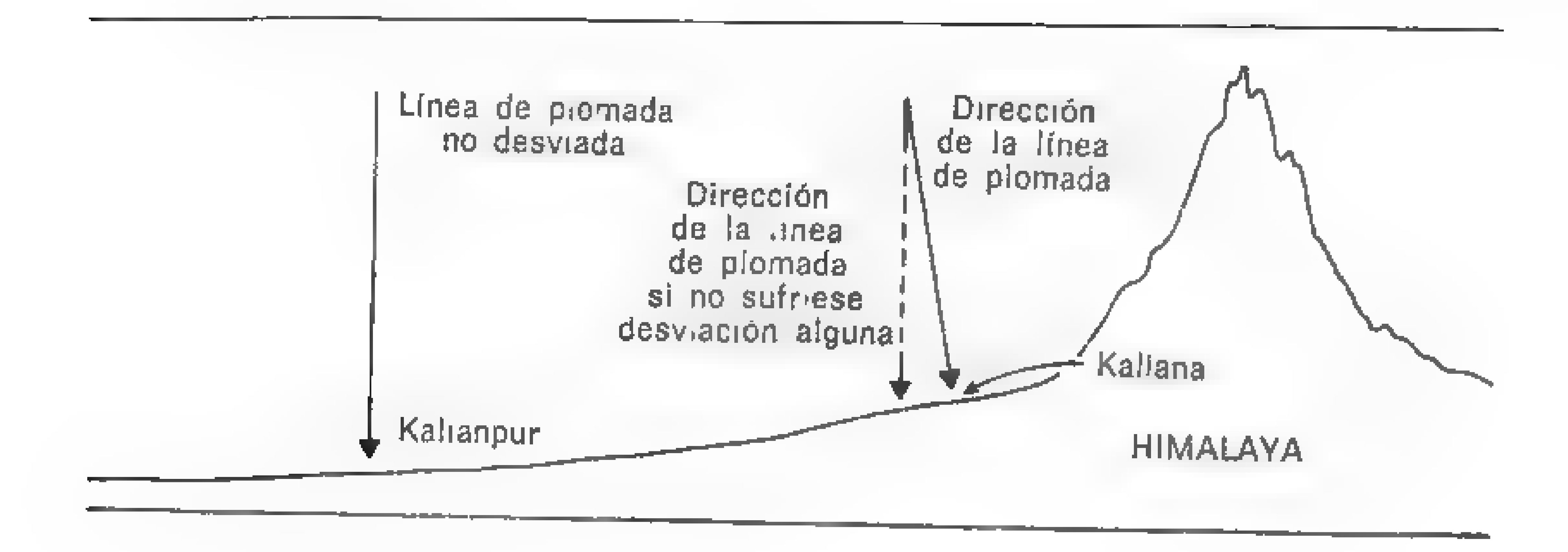
En total murieron 50.000 personas, 800.000 quedaron sin hogar y dos ciudades fueron arrasadas. ¿Por qué? ¿Cuál fue la causa de ese catastrófico suceso? Para comprender las causas verdaderas de este terrible desastre es necesario tener un cierto conocimiento de las modernas teorías geológicas y, especialmente, comprender los conceptos de la deriva continental, la tectónica de placas y los procesos de formación de montañas.

Para una persona no versada en la materia no es fácil aceptar que todas las rocas existentes sobre la faz de la Tierra tuvieron un origen más o menos violento, como tampoco le será fácil aceptar que las colinas y valles que nos rodean no han estado siempre en el mismo lugar. Desde la formación de nuestro planeta, hace unos 4.600 millones de años, las rocas de su superficie han sufrido muchos cambios; algunas han sido completamente refundidas, otras han estado sometidas a intensas presiones y a elevadas temperaturas, mientras que otras han sido fragmentadas por el lento pero persistente proceso de la erosión para formar los componentes de otras rocas. Ciertamente, la erosión ha existido desde el momento en que se formó la atmósfera terrestre; los daños catastróficos ocasionados por algunas inundaciones en la India, Australia y el valle del Mississippi en los últimos años demuestran la incidencia de la misma sobre nuestras vidas. La erosión forma parte de un proceso continuo de reciclaje que se produce en

la superficie de la Tierra, pero también en su subsuelo, donde fuentes de calor no observables directamente crean nuevas rocas fundidas y donde rocas aparentemente rígidas son moldeadas como si fuesen de barro. Tal y como vimos en el capítulo anterior, la comprensión de la Tierra y de sus procesos geológicos antiguos está llena de dificultades, y cuanto más retrocedemos en el tiempo, más incierta es la interpretación de los eventos geológicos. Una de las causas de esta situación es que muy a menudo las rocas más antiguas son precisamente las que están más alteradas. Esto significa que antes de que un científico pueda vislumbrar el proceso o los procesos responsables de la formación de una roca dada, debe descifrar primero su verdadera naturaleza identificando todos los factores que la han llevado hasta su actual estado de alteración: las cantidades de los diversos elementos que le han sido añadidos y sustraídos durante los períodos en que estuvo sometida a temperaturas y presiones elevadas, el tipo y el grado de plegamiento a que ha sido sometida, la compresión que ha experimentado, etc. Deberíamos hacernos preguntas como, por ejemplo, por qué se hallan actualmente calizas fosilíferas, formadas en mares cálidos someros, a miles de metros por encima del nivel del mar. Recientemente, se han descubierto calizas de este tipo ¡cerca de la cima del Everest! Las evidencias registradas en las rocas no son cuestionables. ¿Cuáles son, pues, las fuerzas de la naturaleza que las han levantado desde los fondos de antiguos océanos hasta las cimas de algunas de las montañas más altas de la Tierra, en donde afloran intensamente plegadas?

Sir Francis Bacon, filósofo inglés, hombre de Estado, hombre de letras y agudo estudioso de las ciencias, fue el primero en llamar la atención acerca de las notables similitudes geográficas entre los perfiles atlánticos de África y Sudamérica. En aquella época —1620—, tal "coincidencia" sólo suscitó una duda y una débil curiosidad científica; la iniciación de estudios científicos rigurosos y la recopilación de datos fiables no empezarían hasta 300 años más tarde. En la década de los 70 del siglo pasado, los viajes y las investigaciones efectuadas mediante los navíos *HMS Challenger* y *USS Tuscarona* revelaron los grandes rasgos morfológicos de los fondos oceánicos, pero, incluso así, la comunidad científica aún no estaba preparada para aceptar de forma generalizada las ideas de la deriva continental; sin embargo, los descubrimientos efectuados en esa época constituirían los pilares sobre los que se sustentarían los futuros avances científicos sobre el tema.

Durante el reconocimiento trigonométrico de la India, en el siglo XIX, se descubrió que algunas estaciones de medición cuyas posiciones habían sido determinadas mediante métodos astronómicos no coincidían con aquellas que habían sido determinadas por triangulación. El archidiácono J. H. Pratt, clérigo británico, quedó fascinado por el problema y sugi-



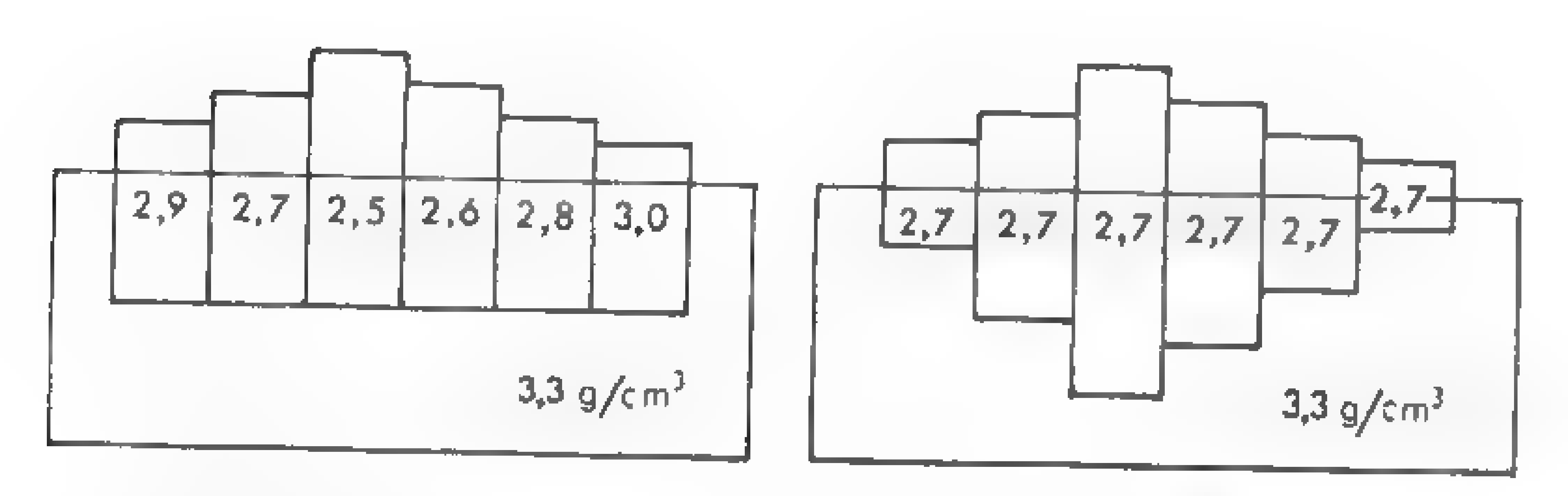


Fig. 8. El reconocimiento trigonométrico de la India efectuado en el siglo XIX mostró una gran discrepancia en las posiciones de dos estaciones de medición, Kalianpur y Kaliana. Los métodos de reconocimiento astronómico proporcionaban unos valores que fueron considerados precisos, mientras que las técnicas de triangulación, que dependen principalmente de una línea de plomada vertical, daban valores distintos de lo que en un principio cabía esperar.

Pratt llegó a la conclusión de que la masa del Himalaya, al norte, ejercía un ligero efecto gravitacional sobre la plomada, el cual era la causa de los errores en las mediciones. Pratt creía que la base de la corteza que infrayace bajo las llanuras, las colinas y las montañas se hallaba en todas partes al mismo nivel, flotando sobre un sustrato más denso. Para explicar las diferentes alturas de esas formas del relieve era necesario atribuirles densidades distintas; los bloques más ligeros formarían las montañas, mientras que los bloques más densos darían lugar a las llanuras y a las regiones bajas.

Las diferencias entre la teoría de Pratt y la de Airy estriban en que, para este último autor, todos los bloques tienen la misma densidad y, además, las diferentes alturas de las montañas, las colinas y las llanuras sólo son atribuibles a la existencia de variaciones en el espesor de la corteza terrestre. Según Airy, las montañas tienen raíces profundas, mientras que según Pratt no es así. Utilizando la teoría de Airy es muy fácil demostrar que las sustracciones de material en los bloques montañosos provocarán el ascenso de los mismos en busca de restablecer su equilibrio.

rió que el macizo del Himalaya, situado al norte, estaba desarrollando un ligero efecto gravitacional sobre la línea de plomada de los instrumentos de reconocimiento, introduciendo por tanto errores en las mediciones. Después de profundizar en sus investigaciones, Pratt llegó a la conclusión de que las montañas, las colinas y las llanuras estaban "flotando" sobre un sustrato más denso y de que sus alturas respectivas dependían de sus densidades: en sus hipótesis era necesario que sus densidades fuesen distintas, puesto que asumía que sus bases se hallaban en todos los casos al mismo nivel. G. B. Airy, Astrónomo Real de la Gran Bretaña en aquella época, aceptó la mayoría de las ideas de Pratt, pero sugirió en cambio que posiblemente las montañas, las colinas y las llanuras tenían en todos los casos la misma densidad y que sus alturas relativas se debían principalmente a diferencias en su espesor. Indicó que un grueso bloque cortical flotante se hundiría a mayores profundidades en el sustrato, pero su altura por encima de la superficie sería asimismo mayor que la de un bloque más delgado con la misma densidad. Este planteamiento constituye la denominada "teoría Airy", ampliamente aceptada en nuestros días. Se dice que cada uno de los bloques flotantes está en *equilibrio isostático* (o *gravitacional*).

Antiguamente se creía que tanto los plegamientos de capas inicialmente horizontales como los grandes espesores de las rocas en las cadenas montañosas eran debidos al proceso de contracción que experimentaba la Tierra a medida que se iba enfriando de su alta temperatura inicial; pero la cantidad máxima de acortamiento de la corteza terrestre alcanzable mediante este mecanismo no permite explicar, por insuficiente, algunos de los acortamientos que han sido observados. Así, el estudio de los grandes pliegues de los Alpes europeos, efectuado ya a finales del siglo XIX por los geólogos suizos Albert Heim y Joseph Cadisch, parecía indicar que los compartimentos norte y sur de esta gran cadena montañosa se habían desplazado el uno contra el otro; este desplazamiento habría comportado una importante reducción horizontal del espacio original, ya que rocas estratificadas inicialmente horizontales, acumuladas en un mar de unos 650 kilómetros de ancho, habían sido comprimidas y convertidas en una cadena montañosa de tan sólo 160 kilómetros de ancho. Investigaciones posteriores, en las que se utilizaron instrumentos geofísicos, demostraron que esta compresión provocaba la formación de raíces profundas en las rocas ligeras que constituían las montañas, tal y como Airy había sugerido anteriormente. Actualmente, en el noroeste, Escandinavia está experimentando un lento pero persistente alzamiento como consecuencia de la fusión del casquete de hielo pleistocénico que la cubría, hace de ello unos 10.000 años; se calcula que para que Escandinavia alcance el equilibrio gravitacional aún es necesario que esta región se eleve unos 150 metros más. Tales movimien-

tos verticales deben ser compensados por movimientos horizontales profundos de materiales; esto nos lleva a la conclusión de que una parte del sustrato de la corteza terrestre debe ser capaz, no sólo de fluir, sino también de transportar las masas continentales suprayacentes

Hace unos cincuenta años, un meteorólogo y explorador alemán murió entre los hielos que cubren Groenlandia. Mientras vivió, y también durante muchos años después de su muerte, este hombre fue considerado un lunático, puesto que sostenía que los continentes, empujados por fuerzas invisibles, se desplazaban por encima de la faz de la Tierra. Alfred Wegener, el autor de esta idea, nació en Berlín en 1880; era hijo de un predicador. Pasó gran parte de su vida académica escribiendo sobre meteorología y, antes de que perdiese su vida en 1930, ya había estado tres veces en Groenlandia. Sus ideas eran demasiado avanzadas para su tiempo; por eso, y aunque hoy sepamos que Wegener estaba en lo cierto, entonces fueron rechazadas por la inmensa mayoría de científicos. Durante 25 años, los únicos defensores de la teoría de Wegener fueron hombres geniales como Arthur Holmes, el geólogo estructural británico sir Edward Bailey, y el fiel discípulo de Wegener, el geólogo sudafricano Alexander Du Toit.

Cuando se dan las condiciones idóneas para que se produzca un nuevo avance en la teoría científica, no es extraño que diversos investigadores lleguen simultáneamente a la misma conclusión. Todos empiezan a partir de una idea, o de un conjunto de ideas. A continuación, se examinan y se seleccionan las evidencias que permitirán determinar la validez o no de las nuevas ideas. Si éstas son válidas, entonces se convierten en hipótesis. El siguiente paso es usar la hipótesis para comprobar si pueden hacerse predicciones acertadas a partir de la misma: si efectivamente se puede, la hipótesis adquiere el status de teoría. Esta teoría irá siendo perfeccionada paulatinamente y permitirá explicar el cómo, el porqué, el cuándo y el dónde de las cosas o hechos a que se refiera. Un avance científico del tipo que acabamos de describir se produjo, en relación con los procesos de formación de montañas y riesgos geológicos asociados, en los años 50 y 60 del presente siglo; durante esos años vio la luz y se desarrolló plenamente una nueva disciplina científica dentro de las ciencias de la Tierra: la tectónica de placas. La teoría de la tectónica de placas es de una simplicidad notable y, por tanto, fácilmente comprensible. Explica por qué los terremotos y los volcanes se concentran a lo largo de estrechos cinturones y por qué los volcanes situados en tierra firme suelen estar a menos de 200 kilómetros de distancia del mar. También explica por qué en algunas de esas zonas o cinturones los terremotos son de origen somero (como en la vecindad de la Falla de San Andrés), mientras que en otras zonas los focos sísmicos se hallan a gran profundidad (como en la región de Tonga-Kermadec). Además, también

nos enseña por qué los fondos oceánicos son más jóvenes que los continentes que les rodean ¿Qué fue, pues, lo que motivó la rehabilitación de las hipótesis de Wegener, provocó una auténtica revolución en las ciencias de la Tierra y permitió crear una teoría global acerca del comportamiento geológico de nuestro planeta?

En 1960, el profesor Harry Hess, de la Universidad de Princeton, EE.UU., presentó su obra clásica sobre la expansión de los fondos oceánicos Hess había sido oficial en un submarino de las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial y estaba muy familiarizado con el océano Pacífico. Hess seguía al geofísico holandés F. Vening Meinesz en la creencia de que la súbita ruptura del equilibrio isostático evidenciado en las fosas oceánicas profundas próximas al Japón, las Filipinas y las Indias Orientales significaba que en esos lugares la corteza estaba siendo curvada y hundida hacia abajo por una terrible fuerza invisible, quizás el limbo descendiente de una corriente de convección en el manto. Sin embargo, con anterioridad al año 1960, Hess aún opinaba que el océano Pacífico era un elemento muy antiguo, quizás primigenio, de la Tierra. Durante muchos años, Hess había estado interesado por las montañas submarinas o *guyots* —montañas de origen volcánico y cima aplanada que se levantan sobre los fondos oceánicos—, de los cuales hay un gran número repartidos por todo el Pacífico. Estaba convencido de que los guyots habían sido, en algún momento de su historia, islas volcánicas normales truncadas a la altura del nivel del mar por la acción de las olas; el hecho de que sus aplanadas cimas se encuentren ahora a diferentes profundidades por debajo del nivel del mar era interpretado por Hess como una evidencia de la subsidencia persistente de los guyots.

En los años 50 las investigaciones oceanográficas experimentaron un gran auge: el mundo entero se sintió interesado por aquel 70 por ciento de nuestro planeta, hasta entonces prácticamente desconocido, que yace bajo las aguas de los mares y océanos. Uno de los primeros resultados de estas investigaciones fue el dragado de fósiles cretácicos en las cimas de algunos guyots; siguió el descubrimiento de que en los fondos del océano Pacífico habían muchos menos sedimentos de lo que cabía esperar a tenor de su supuesta antigüedad. En todos los océanos se identificaron y cartografiaron grandes cadenas montañosas submarinas, las dorsales medio-oceánicas Había llegado el momento de plantearse muchas cuestiones, y de responderlas. Hess se preguntó a sí mismo: "¿Podría ser el Pacífico un océano relativamente joven, no más viejo que el Mesozoico?" Y, basándose en sus conocimientos acerca de los guyots, respondió afirmativamente a la pregunta. Vio que las islas volcánicas truncadas por la acción del oleaje en las crestas de las dorsales oceánicas se iban hundiendo progresivamente a lo

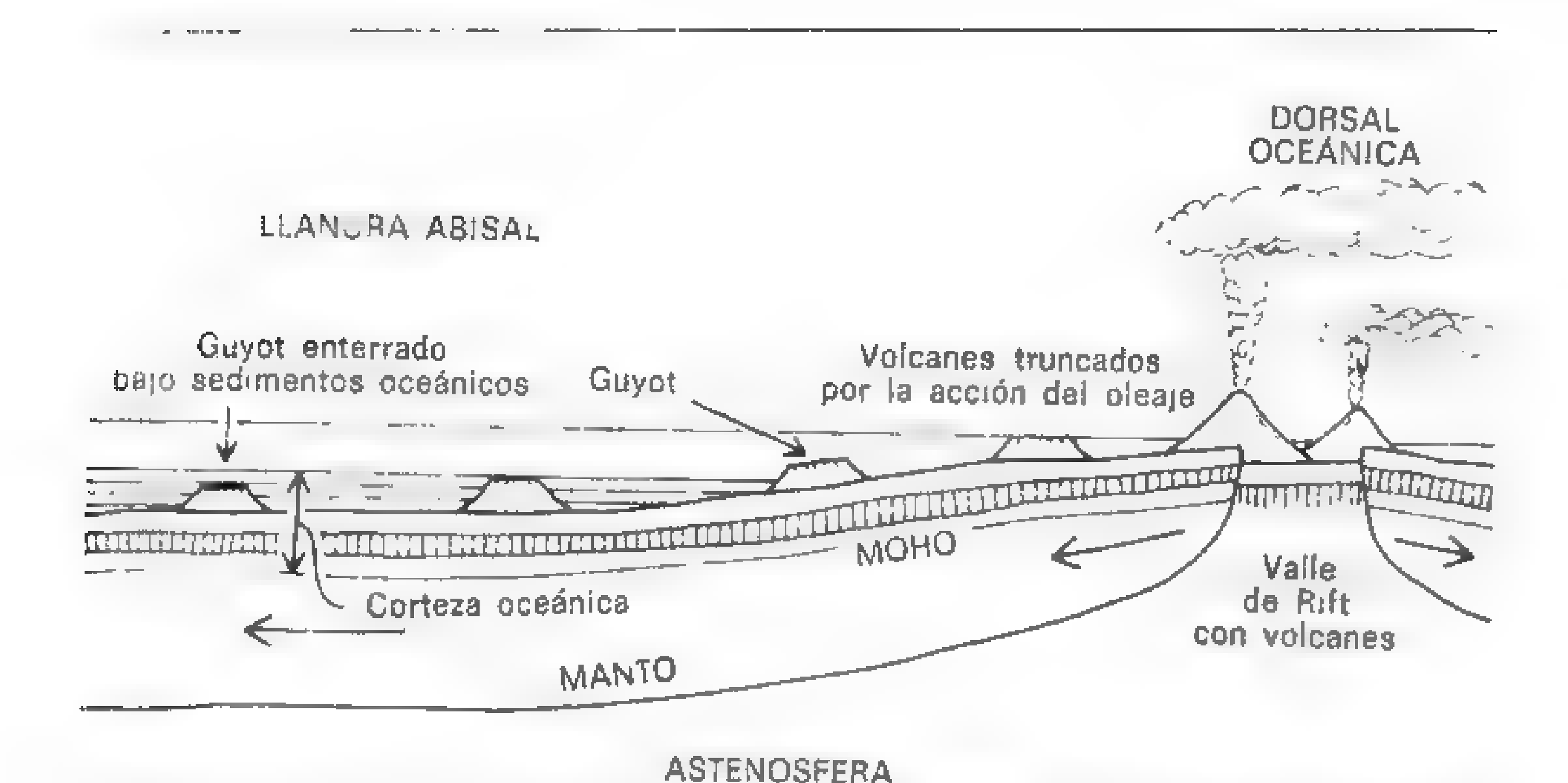


Fig. 9. Los guyots son volcanes truncados sumergidos. En la ilustración se ha representado la formación de unos volcanes en un valle de rift de una dorsal oceánica activa. Las rocas fundidas (magma) ascienden hasta la superficie a lo largo de grietas en la corteza terrestre. Más tarde, el magma se enfría y rellena esas grietas, incrementando en consecuencia la anchura de los fondos oceánicos y provocando su expansión hacia ambos lados de la dorsal. A medida que va siendo creada, la nueva corteza se va alejando de la dorsal transportando sobre sus espaldas los volcanes recién formados, como si se tratase de una enorme cinta transportadora natural. Los volcanes son truncados o decapitados por la acción del oleaje y se convierten en guyots, los cuales a medida que pase el tiempo se irán sumergiendo y alejando de la dorsal. Poco a poco, esos guyots irán siendo enterrados bajo sedimentos oceánicos más jóvenes.

largo de los taludes de los relieves submarinos, hasta alcanzar varios miles de metros de profundidad. A partir de esta observación dedujo que en los fondos oceánicos debían producirse desplazamientos que provocaban el alejamiento paulatino de esas islas respecto a las crestas de las dorsales, como si se tratase de una gigantesca cinta transportadora.

La brillante sugerencia de Hess de que el fondo oceánico no era estático, sino móvil, con procesos expansivos permanentes en las dorsales oceánicas, constituyó la base de la teoría de la tectónica de placas, la cual alcanzaría su pleno desarrollo en la década siguiente. Hess estaba, sin duda, influenciado por un predecesor, David Griggs, quien en 1939, desde Harvard, sugirió que las rocas jóvenes que alcanzaban la superficie de los fondos del océano Pacífico estaban asociadas con montañas suboceánicas y que la expansión de rocas recién formadas a partir de esos picos contribuía al crecimiento de los fondos oceánicos. Griggs también creía que una gran célula de convección en el manto subyacía bajo el océano Pacífico y que la

misma era la responsable de esos fenómenos, provocando ascensos de materiales profundos en el centro del Pacífico y descensos de materiales superficiales, acompañados por frecuentes terremotos, en los bordes de los continentes peripacíficos. En los años 50 se sabía que esos terremotos se originaban en grandes dislocaciones o fallas acostadas cuyos planos inclinados buceaban por debajo de los continentes. Hess postuló que las grandes fosas oceánicas se habían formado probablemente como consecuencia del hundimiento y consunción de la corteza oceánica bajo los continentes adyacentes.

Las evidencias proporcionadas por la investigación de las ondas sísmicas ya habían demostrado que la Tierra estaba constituida por varias envolturas concéntricas, cada una de las cuales tenía un espesor y una composición diferentes. Desde el centro de la Tierra hacia afuera esas envolturas son el núcleo interno, el núcleo externo, el manto inferior y el superior, y la corteza. En los años 50 se descubrió que el manto superior podía dividirse en dos subzonas, una de las cuales es una zona pastosa, de comportamiento plástico, denominada capa de baja velocidad debido a que las ondas sísmicas la atraviesan más lentamente a causa de su falta de rigidez. En algunos lugares bajo los fondos oceánicos, las rocas son calentadas hasta temperaturas muy elevadas en esa zona de plasticidad; ello conlleva una disminución de su densidad, cosa que les confiere un carácter expansivo, y provoca su ascenso relativo hacia las rocas más densas y más frías que las circundan y sobre las cuales la gravedad ejerce un mayor efecto. Cuando esas rocas plásticas ascendentes se aproximan a la superficie, se funden parcialmente, dando lugar al vulcanismo de los fondos oceánicos y a actividad intrusiva por debajo de los mismos. La nueva corteza oceánica así formada es durante un tiempo más ligera que las rocas enfriadas que la rodean, y adquiere la forma de un lomo elongado de materiales menos densos repartidos a lo largo de las grietas y fisuras a través de las cuales han alcanzado la superficie los magmas que la han originado.

Mientras se iban juntando todas las piezas del rompecabezas para formar un cuadro significativo, las investigaciones sobre los fondos oceánicos continuaban; se intensificaron los reconocimientos geomagnéticos y por primera vez se introdujo, como operación rutinaria en los trabajos oceanográficos, la inmersión de magnetómetros que permitiesen registrar automáticamente las variaciones de la intensidad del campo magnético terrestre. Los resultados fueron aparatosos. Los datos obtenidos mostraron la existencia de zonas elongadas con intensidades magnéticas altas y bajas; la anchura de esas zonas oscila entre unos pocos kilómetros y un centenar de kilómetros; su longitud puede ser de varios miles de kilómetros. Esas zonas elongadas, o *anomalías magnéticas*, son paralelas a las dorsales oceánicas.

La explicación de las mismas era incierta. Era evidente que los trazados de las curvas de isovalores del campo magnético estaban dislocados por grandes fallas submarinas, además, tales trazados estaban profundamente alterados en las proximidades de las fosas oceánicas y en los márgenes continentales. Todos los geólogos y geofísicos del mundo estaban intrigados por el asunto.

En 1956, un grupo de científicos que estaban trabajando en Inglaterra bajo la dirección de Sir Edward Bullard, P. M. S. Blackett y Keith Runcorn, descubrió que existía un orden en las aparentemente desordenadas direcciones magnéticas registradas en las rocas antiguas; así, llegaron a la conclusión de que los continentes se habían desplazado los unos respecto a los otros y respecto a los polos magnéticos durante largos períodos de tiempo geológico. El mismo año, Bruce Heezen y Maurice Ewing, del observatorio geológico Lamont-Doherty, a orillas del río Hudson, descubrieron que los terremotos asociados con las dorsales medio-oceánicas estaban concentrados a lo largo de un valle de rift central ubicado en el vértice de la dorsal e indicaba que una cordillera montañosa suboceánica de 64.400 kilómetros de longitud daba la vuelta al mundo por el océano y fondo de los mares.

Hacia el año 1962, la explicación de Hess acerca del origen y la edad de las cuencas oceánicas estaba ganando rápidamente adeptos entre la comunidad científica. Sin embargo, fue Robert Dietz, un geólogo marino de los "Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories" de Miami, el primero en utilizar la expresión "expansión de los fondos oceánicos". La hipótesis de la expansión de los fondos oceánicos en su forma totalmente desarrollada postula la creación continua de corteza oceánica en las dorsales medio-oceánicas: los materiales del manto alcanzan la corteza superior a través de los valles de rift de las dorsales. A medida que van abriéndose y llenándose nuevas zonas de fisura, el fondo oceánico se desplaza progresivamente hacia los lados de las dorsales medio-oceánicas activas.

La hipótesis fue puesta a prueba en 1963, cuando Frederick Vine y Drummond Matthews combinaron las ideas de Hess acerca de la expansión de los fondos oceánicos con las investigaciones en curso acerca de la escala de tiempo de las inversiones geomagnéticas. A raíz de una campaña de dragado de los fondos oceánicos, en el año 1961 Matthews estaba ya convencido de que la dorsal medio-atlántica tenía un origen volcánico por completo. Vine creía que las evidencias clave que permitirían demostrar la deriva continental tenían que hallarse en estudios sobre geología y geofísica marinas. Trabajando juntos como miembros del equipo de Sir Edward Bullard, en la Universidad de Cambridge, empezaron a comparar y a contrastar sus ideas con los nuevos datos que iban siendo obtenidos en todos los océanos del mundo. Como resultado de su esfuerzo conjunto surgió la

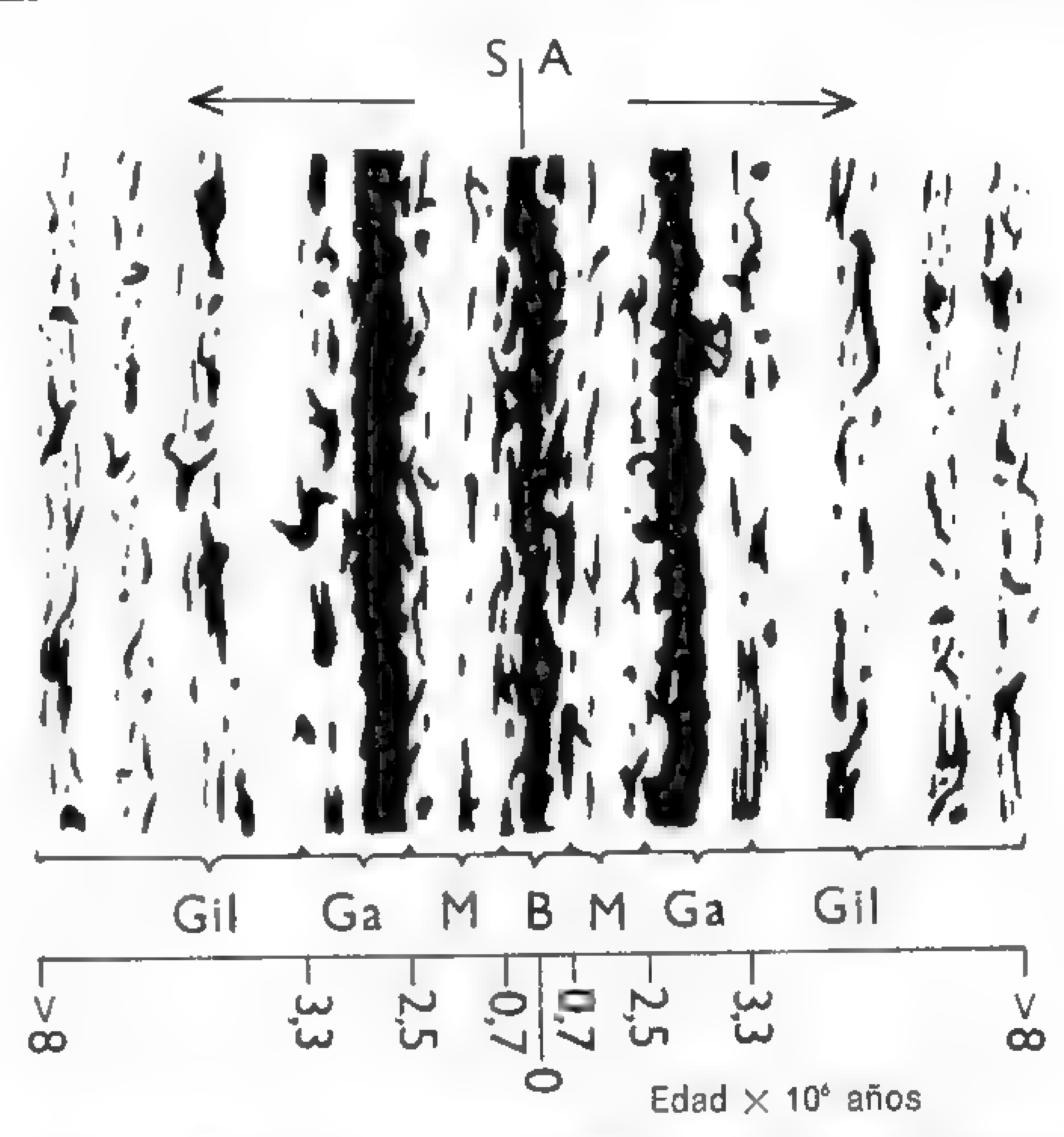


Fig. 10. Bandas de anomalías magnéticas: muestra de las anomalías magnéticas típicas de la dorsal medio-atlántica al sur de Islandia. Las bandas paralelas simétricas respecto al eje de la dorsal están constituidas por bandas de rocas volcánicas magnetizadas por el campo magnético dominante en la Tierra en el momento de su enfriamiento. Quedan así preservadas las inversiones de la polaridad del campo magnético terrestre.

SA = dorsal expansiva, Gil = época inversa de Gilbert, Ga = época normal de Gauss, M = época inversa de Matuyama, B = época normal de Brunhes.

hipótesis de que las rocas volcánicas eyectadas continuamente en las dorsales oceánicas deben quedar magnetizadas por el campo magnético terrestre existente en el momento del enfriamiento de esas rocas volcánicas por debajo de lo que actualmente se conoce como *punto de Curie* (temperatura de unos 600 °C, aproximadamente, por encima de la cual las rocas pierden su magnetismo). Por debajo del punto de Curie, las partículas que contienen hierro quedan magnetizadas permanentemente, según una orientación

paralela a la del campo magnético terrestre. La impronta magnética que reciben es muy sutil, pero los modernos instrumentos permiten medirla y datarla fácilmente. Se había descubierto hacía poco que el campo magnético de la Tierra ha sufrido inversiones completas de su polaridad a intervalos irregulares de tiempo. Por tanto, argumentaban Matthews y Vine, la sucesión de anomalías magnéticas de los fondos oceánicos debe haber sido causada directamente por tales inversiones y constituye, de hecho, un registro fósil de las inversiones del campo magnético terrestre a lo largo de los tiempos geológicos. Además, sugirieron que la distribución de las bandas de anomalías magnéticas debería ser simétrica y paralela a uno y otro lado de las dorsales expansivas medio-oceánicas.

Muchos investigadores se pusieron a verificar la hipótesis de Matthews y Vine. Gran parte de estos importantes trabajos fue llevada a cabo por la Universidad Nacional de Australia y por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. El entusiasmo y el espíritu competitivo de los diferentes equipos científicos fue tan grande que se desató una auténtica carrera investigadora plasmada en la publicación, en breve espacio de tiempo, de un gran número de artículos científicos que confirieron a la datación de las inversiones geomagnéticas un grado de sofisticación desconocido hasta entonces.

En los años 60, y después de que el Proyecto Mohole (que pretendía perforar la corteza hasta alcanzar el manto) fuese abandonado, la "National Science Foundation" patrocinó el "Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling" (JOIDES). El buque oceanográfico escogido fue el *Glomar Challenger*, el cual, una vez modificada su sarta de perforación petrolífera, podía extraer testigos de roca de los fondos oceánicos de casi dos kilómetros de longitud. Según la hipótesis de la expansión de los fondos oceánicos, se había predicho que en las crestas de las dorsales medio-oceánicas sólo deberían hallarse basaltos jóvenes; se había predicho, asimismo, que la edad de las rocas de los fondos oceánicos, tanto volcánicas como sedimentarias, debería aumentar progresivamente a medida que lo hacía la distancia respecto a las dorsales. El *Glomar Challenger* empezó a trabajar en el Atlántico y muy pronto se demostró que la hipótesis de la expansión de los fondos oceánicos estaba en lo cierto: no había ningún indicio de la presencia de sedimentos antiguos en la parte central de esa cuenca oceánica. Este hallazgo era de gran importancia, porque el descubrimiento de sedimentos antiguos en ese lugar habría significado el fin de las hipótesis de la expansión de los fondos oceánicos y de la tectónica de placas.

Actualmente se sabe que en ningún océano del mundo hay sedimentos más antiguos que el Jurásico. La combinación de la datación radiométrica de rocas volcánicas mediante el método del potasio-argón con diversos estudios paleomagnéticos permitió desarrollar una escala de tiempo global de las inversiones paleomagnéticas susceptible de ser aplicada a las investigaciones sobre los fondos oceánicos. Este hecho, unido a un importante incremento de la cantidad y la calidad de los datos acerca de las bandas magnéticas, hizo que la hipótesis de Vine y Matthews ganase rápidamente adeptos. La prueba definitiva la proporcionó la medición detallada del perfil magnético transversal de la dorsal del Pacífico Oriental, al sur de la Isla de Pascua. Era evidente que las bandas magnéticas eran simétricas a uno y otro lado de la dorsal, tal y como se había predicho con anterioridad. La hipótesis era acertada y podía, por tanto, ser elevada a la magna categoría de teoría. Hess, Vine y Matthews habían forjado la pieza clave que permitiría penetrar en los misterios de las cuencas oceánicas mundiales. A partir de ese momento ya era posible decir cómo y cuándo se había formado una cuenca determinada, con un grado de exactitud sin precedentes.

En la misma época, a comienzos de los años 50, en que se produjo este gran avance en las ciencias oceanográficas, empezó a instalarse una red sismográfica normalizada a escala mundial (véase el capítulo 4). El planteamiento inicial de la misma era el llegar a diferenciar las ondas sísmicas generadas por los ensayos nucleares de las ondas sísmicas producidas por los terremotos con el fin de registrar y controlar la realización de tales ensayos, especialmente si eran secretos y los llevaban a cabo potencias enemigas. Sin embargo, este sistema de detección también proporcionó, y sigue proporcionando, muchísimos datos de gran calidad y valiosísimas informaciones originales acerca de las posiciones y las profundidades de los focos de un gran número de terremotos. Se descubrió que, en general, los focos de los seísmos se alineaban a lo largo de unos cinturones paralelos a las grandes cadenas montañosas, incluidas las dorsales medio-oceánicas; además, se vio que dichos focos se situaban sobre planos inclinados que representaban la continuación de la corteza de las grandes fosas oceánicas por debajo de las masas continentales o arcos de islas adyacentes.

J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto, se dio cuenta de que los movimientos de la corteza terrestre se concentraban principalmente en tres tipos de elementos estructurales caracterizados por su elevada actividad volcánica y sísmica: sistemas montañosos y arcos insulares (cinturones móviles), dorsales expansivas medio-oceánicas, y grandes fallas con importantes desplazamientos horizontales. En 1965 sugirió que estos cinturones móviles, dorsales expansivas y grandes fallas estaban interconectados por una especie de malla continua que dividía la superficie de la Tierra en varias *placas* rígidas. Además, indicó que, en sus bordes aparentes, cualquiera de estos tres tipos de elementos estructurales podía transformarse en uno de

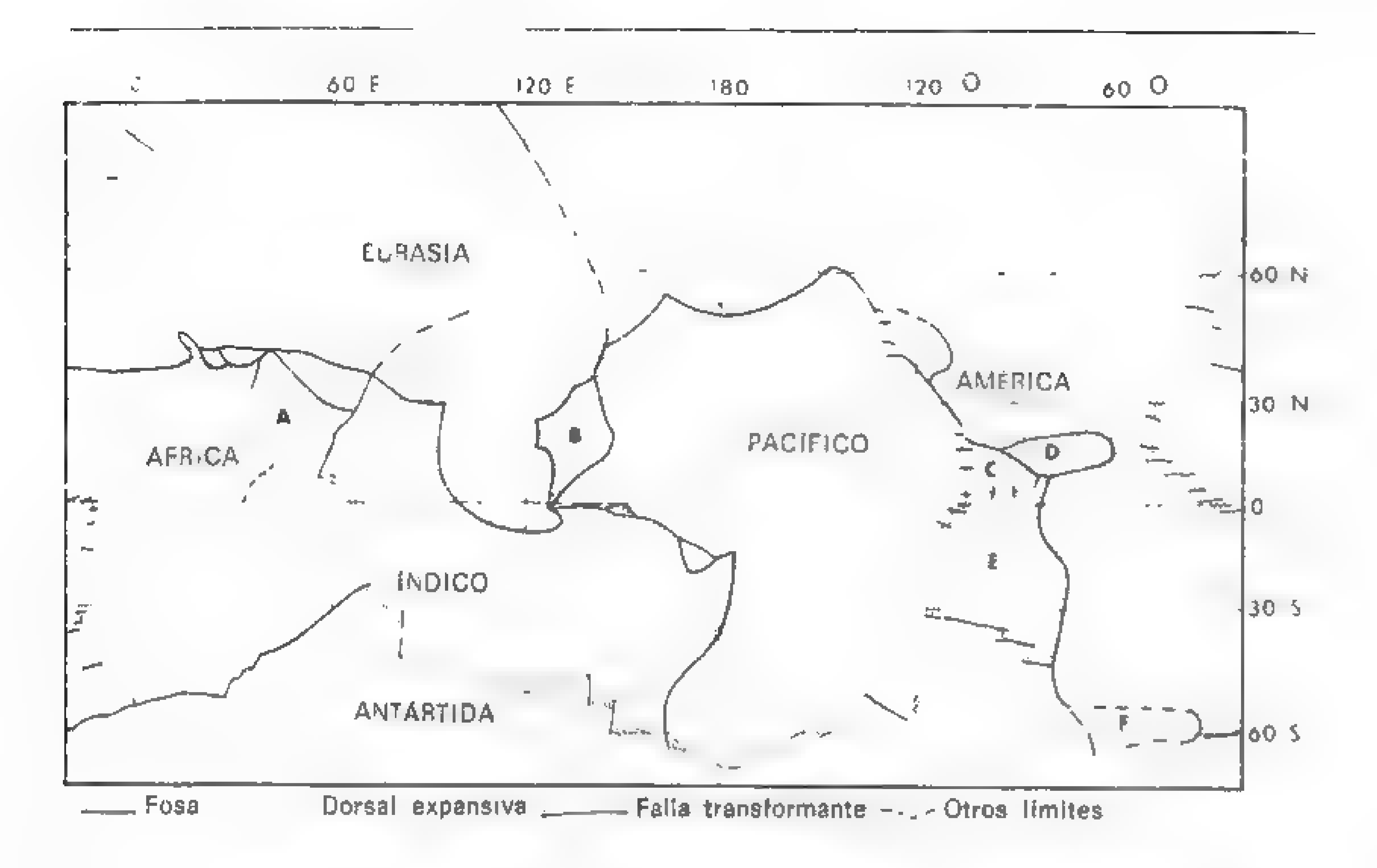


Fig. 11. Las placas del mundo: la corteza terrestre está fragmentada en varias placas debido a la acción combinada de las dorsales oceánicas que provocan la expansión de los fondos oceánicos, las fallas que dislocan grandes fragmentos crustales a lo largo de miles de kilómetros, y las fosas de la zona de Benioff y los arcos insulares en donde se consumen los excesos de material cortical. Existen seis placas mayores y seis placas menores, tal como se indica aquí. Con el fin de ganar en claridad, no se han representado en este esquema las innumerables micro-placas que existen.

A = Placa Arábiga, B = Placa Filipina, C = Placa de Cocos, D = Placa del Caribe, E = Placa de Nazca, F = Placa Escocesa.

los otros dos tipos. Llamó *fallas transformantes* a las grandes fallas cizallantes de componente horizontal contra las que los desplazamientos se detienen bruscamente y cambian de dirección en cada uno de sus dos extremos. En seguida se vio que las fallas transformantes transversales tenían una gran importancia en las dorsales expansivas, en las cuales causan numerosas dislocaciones que desplazan lateralmente los ejes de tales dorsales confiriéndoles el carácter quebrado característico de su recorrido longitudinal.

Entre 1967 y 1969, tres jóvenes geofísicos, Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, Dan McKenzie, miembro del equipo de Bullard en Cambridge, y Xavier Le Pichon, un francés que había pasado varios años en el Lamont, formularon lo que pronto sería conocido como teoría de la *tectónica de placas:* una elegante hipótesis que permitía explicar y predecir

los movimientos de las placas corticales en que podía ser dividida la superficie de nuestro planeta. Sus trabajos provocaron una nueva explosión de las investigaciones geológicas que condujeron a la actual concepción global de la Tierra. Se descubrió que las dorsales constructivas medio-oceánicas, las fallas transformantes a lo largo de las cuales unas placas corticales se deslizan unas tras otras, y los márgenes destructivos de las fosas oceánicas, los arcos insulares y algunos continentes, estaban todos ellos interrelacionados por una malla global de zonas de sismicidad que subdividía a la superficie de la Tierra en seis placas principales y en unas diez placas menores o microplacas. El vulcanismo genera nueva corteza oceánica en forma de rocas menos densas que alcanzan la superficie en las dorsales expansivas medio-oceánicas. Estas dorsales están cizalladas transversalmente por fallas transformantes debido a las diferentes tasas de expansión existentes a lo largo de sus ejes; las tasas actuales de crecimiento de los fondos oceánicos pueden ser determinadas mediante las escalas de tiempo de las bandas magnéticas. La corteza oceánica es tanto más vieja cuanto más alejada está del eje de la dorsal que la generó; esa corteza puede ser destruida en las denominadas zonas de subducción de las fosas oceánicas; en esas zonas, la corteza oceánica se hunde debajo de la placa adyacente dando lugar a la aparición de un plano inclinado sísmicamente activo. Tanto la expansión de los fondos oceánicos como la teoría unificada de la tectónica de placas fueron confirmadas en pocos años. Había nacido la geología moderna.

Mientras tanto, a mediados de los años 60, Sir Edward Bullard y sus colegas Jim Everett y Alan Smith estaban intentando encajar los perímetros geográficos de las actuales masas continentales valiéndose de las más modernas técnicas y de los más sofisticados programas de computador existentes por aquel entonces en Cambridge. Salvo raras excepciones, alcanzaron su objetivo. Tomando como verdadero límite de los continentes el borde de la plataforma continental, y no las líneas de costa, América encaja con África meridional, el noroeste de África encaja con el este de América del Norte, y el norte de Canadá encaja con el este de Asia. El conjunto formado por Australia, la India y la Antártida encaja bastante bien con el margen oriental de África. Este rompecabezas culminó en la reconstrucción de un gran supercontinente al que se llamó Pangea (significa "todas las tierras"), término que ya fue utilizado por Wegener a comienzos de los años 20. Esta reconstrucción de la antigua posición relativa de los continentes fue inmediatamente aceptada por la mayoría de geólogos y geofísicos. Evidentemente, el clima científico había cambiado. Tal y como Wegener había predicho, la existencia de un antiguo Pangea permitía explicar muchos de los problemas que habían estado inquietando a los geólogos durante décadas y décadas: las antiguas edades de hierro, la evolución de las plantas y los

animales, sus migraciones, las diferencias y las similitudes estructurales y geológicas entre diferentes continentes... todo podía ser entonces explicado. Por ejemplo, se sabía que los mamíferos habían evolucionado de maneras distintas en continentes diferentes —el oso pardo, el oso polar, el oso hormiguero, el elefante, el canguro, y muchos otros— a pesar de que en muchas ocasiones tenían ancestros comunes en la línea evolutiva. Esos antecesores no habrían podido cruzar los extensos océanos que actualmente separan los continentes, y la existencia de puentes terrestres que cruzasen los actuales océanos facilitando migraciones masivas desborda incluso la imaginación científica más calenturienta. Pero si los actuales continentes, tan alejados entre sí, formaron una única masa de tierra en algún momento del pasado, estos problemas evolutivos desaparecen por completo. Actualmente, sabemos que la enorme placa continental cortical del Pangea empezó a romperse hace unos 200 millones de años, cuando algunas dorsales expansivas empezaron a manifestarse por debajo de la misma subdividiéndola en muchas piezas menores, entre las cuales surgieron los nuevos océanos. África y Sudamérica, por ejemplo, fueron separándose a medida que iba creciendo el Atlántico Sur; se demostraba, pues, que las observaciones efectuadas por Sir Francis Bacon podían ser explicadas entonces de forma racional: ¡los continentes se han fragmentado y se desplazan por la superficie de la Tierra! La deriva de los continentes puede provocar tanto su fragmentación como su colisión. El Pangea es tan sólo uno de los numerosos supercontinentes que han debido existir a lo largo de la historia de la Tierra; es probable que la ruptura y la reintegración repetidas de los continentes hayan jugado un papel muy importante en la evolución de muchas especies de seres vivientes, entre las cuales no deja de estar el propio hombre.

En su baile alrededor del globo, las placas corticales pueden pasar por encima de *puntos calientes* (*hot spots*). En esos lugares, el magma procedente del manto asciende por un conducto más o menos definido y no a través de un sistema de fisuras o grietas más o menos alineadas tal y como ocurre en las dorsales medio-oceánicas. Cuando un punto caliente está situado debajo de un océano, se forma una alineación de islas volcánicas, que posteriormente se convertirán en montañas submarinas o guyots. Desde Hawaii hacia el oeste-noroeste y después hacia el noroeste, en dirección a la Fosa de las Aleutianas, se halla una larga alineación de islas volcánicas y guyots cuyas edades aumentan progresivamente a medida que aumenta su distancia respecto al punto caliente encima del cual está situada la actual isla de Hawaii. A comienzos de los años 60 se sugirió que el fondo del Pacífico Norte central se había abombado debido al ascenso de una corriente de convección de baja densidad en el manto, pero que, en realidad,

actualmente no existía expansión de los fondos oceánicos en esa región. Por tanto, se interpretaba que las islas volcánicas existentes habían sido truncadas por la acción del oleaje, que las convirtió en atolones y guyots, a medida que todo el abombamiento iba subsidiendo después del cese de la convección en el manto. Esta explicación estática —la hipótesis de Darwin— quedó arrinconada delante del cúmulo de evidencias acerca de la existencia de puntos calientes sobre los que van desplazándose las placas corticales; el propio movimiento de las placas conlleva la formación y el desplazamiento de "racimos" de islas volcánicas y guyots que van alejándose paulatinamente del punto caliente activo. Los puntos calientes situados debajo de las masas continentales provocan elevaciones en forma de enormes bulbos, cúpulas o umbrales. Los valles de rift son, de hecho, fisuras que se desarrollan en las crestas de esos abombamientos crustales, las cuales, eventualmente, facilitan la actividad volcánica extrusiva. Actualmente hay crestas o penachos del manto (puntos calientes incipientes) debajo de los valles de rift de Etiopía y Kenia. En el Mar Rojo y en el Golfo de Adén se está formando nuevo fondo oceánico y el continente ha sido partido a lo largo de lo que fueron anteriores valles de rift sitos en la cresta del umbral continental del Mar Rojo y Etiopía. Los abombamientos corticales situados encima de domos del manto tienen a menudo un trazado trífido que arranca a partir de los llamados puntos triples (*triple junctions*). Continentes enteros pueden haberse ido separando debido a la formación progresiva de sistemas continentales expansivos de dorsal/rift que enlazasen unos domos del manto con otros sobre toda su amplitud. Los geólogos ingleses John Dewey y Kevin Burke propusieron, en 1973, una evolución de este tipo para la cuenca del Atlántico Norte.

Cuando dos placas colisionan, puede ocurrir una de las siguientes cosas. Puede haber un choque frontal entre una placa oceánica y una continental; esto es lo que está ocurriendo actualmente aguas afuera de la costa oeste de Sudamérica, en donde la placa del Pacífico Este o placa de Nazca va descendiendo progresivamente por debajo de la placa arrugada de Sudamérica; este proceso de subducción genera grandes cantidades de calor procedente de la fricción entre ambas placas. Esa fricción provoca terremotos, los cuales a menudo tienen consecuencias catastróficas, como el del año 1971 en Yungay, Perú. Este terrible desastre, con un coste de 50.000 vidas humanas, no ha sido, sin embargo, el único. Tan sólo nueve años antes, en 1962, una enorme masa de hielo de cerca de tres millones de metros cúbicos de volumen cayó desde una altura de 1.500 metros en el Huascarán; como consecuencia de la caída, la masa de hielo se convirtió en una especie de nube formada por miríadas de diminutas partículas atrapadas y suspendidas como un fluido en el aire; la nube se desplazó pendiente

abajo a una velocidad increíblemente alta y arrasó ocho pueblos. Antes de que los pueblos fuesen alcanzados, la masa móvil, incrementada por fragmentos y materiales adicionales que se le iban incorporando, había crecido hasta alcanzar un tamaño descomunal: ¡12 millones de metros cúbicos! Los ríos quedaron obstruidos temporalmente y se produjeron inundaciones calamitosas. En total, el desastre causó 4.000 víctimas. Veintiún años antes, en 1941, una tragedia similar destruyó parcialmente Huaras, también en Perú, y provocó unas 5.000 muertes. Una vez más, igual que anteriormente y posteriormente, una avalancha de rocas, fango y hielo había traído la muerte y la desolación a las tierras situadas en aquellas partes del mundo en que, como consecuencia de las colisiones entre placas, los terremotos, directamente atribuibles a los procesos de formación de montañas, son moneda corriente.

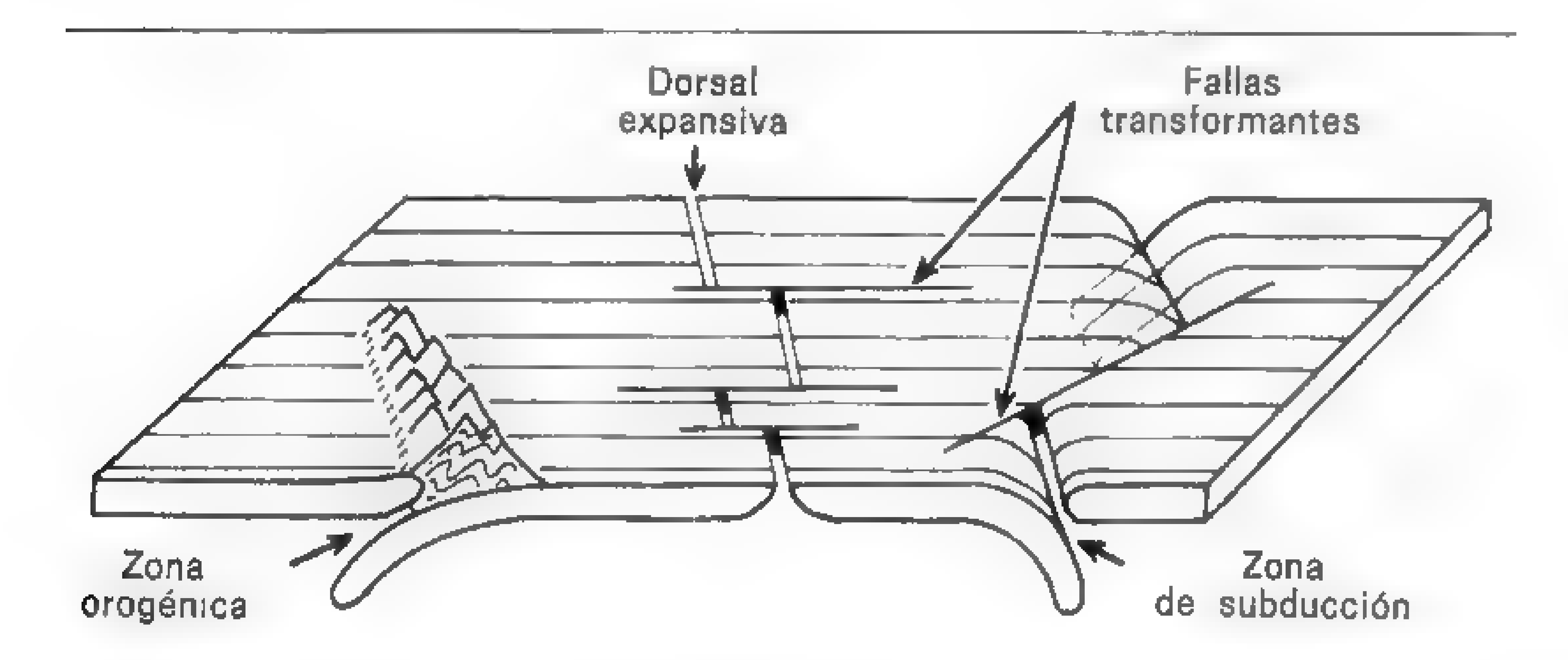


Fig. 12. Límites de placas. En el diagrama de bloque se muestran tres tipos de límites de placas. En primer lugar, la dorsal expansiva, o límite constructivo, en donde la eyección volcánica de materiales nuevos procedentes del manto da lugar a la formación de islas como las Azores, la isla de Ascensión y Tristan da Cunha; las diferentes tasas de expansión a lo largo de la dorsal provocan la rotura de la misma sobre largas fallas transformantes. El segundo tipo de límite de placa, la zona de subducción, o límite destructivo, se forma en los lugares en que una placa oceánica colisiona y se hunde por debajo de una placa continental; eso es lo que ocurre al oeste de las costas de Chile y Perú, en donde la placa de Nazca se hunde debajo de la placa americana. La fricción entre las dos placas genera terremotos, y da lugar a excesos de calor que se traducen por la formación de cadenas de volcanes en la placa cabalgante. El tercer tipo de límite de placa es el que resulta de la colisión entre dos continentes a lo largo de una zona orogénica o de formación de montañas. Los sedimentos oceánicos existentes entre las dos placas son comprimidos, plegados y levantados, formando así grandes sistemas montañosos como los Alpes y el Himalaya

En otros lugares, en vez de colisionar frontalmente, cuando dos placas se encuentran pueden deslizarse lateralmente la una respecto a la otra a lo largo de un sistema de fallas transformantes. La fricción generada durante el deslizamiento también puede provocar sobre la marcha terribles terremotos. Fue precisamente el sistema de fallas transformantes de San Andrés, en California, el responsable de la destrucción de la ciudad de San Francisco en 1906 (véase el capítulo 4).

Pero tanto si la colisión es directa como si no lo es, la gente que vive en esos cinturones activos de colisión entre placas tiene que asumir que se halla sometida a un riesgo permanente de sus vidas. La elevada frecuencia de grandes terremotos y erupciones volcánicas destructivas de América Central es directamente atribuible a la colisión activa entra las placas de Cocos y del Caribe. Managua, la capital de Nicaragua, la mayor de las repúblicas centroamericanas, está ubicada en la costa meridional de uno de los mayores lagos interiores del país. La fertilidad de su suelo volcánico convierte a la región en un vergel; la ciudad, con una población de unos 420.000 habitantes, tiene hermosas vistas sobre el lago y los picos volcánicos de los alrededores; su clima es bonancible y uniforme a lo largo del año. Dos días antes de la Nochebuena del año 1972 el clima festivo que imperaba en Managua quedó roto por una serie de grandes movimientos sísmicos que sacudieron, agitaron y estrujaron la ciudad durante unas tres horas, destruyendo el 75 por ciento de sus edificios y matando a 5.000 personas. Hubo 20.000 heridos y 250.000 personas quedaron sin hogar. Para un país pequeño y relativamente pobre como Nicaragua, las pérdidas económicas fueron asoladoras. De las 70.000 casas de la ciudad, unas 50.000 se habían derrumbado. El 95 por ciento de los edificios comerciales y de las pequeñas industrias estaba destruido, al igual que once grandes fábricas, cuatro hospitales y todas las escuelas. Los primeros temblores se percibieron a últimas horas de la tarde del día 22 de diciembre. La sacudida principal (con una magnitud de 6,2 grados en la escala de Richter —véase el capítulo 4) se produjo media hora después de la medianoche. La sucedieron otras muchas sacudidas menores, de entre las cuales las dos más fuertes se dejaron sentir cuando aún no había pasado ni una hora desde la sacudida principal; ambas contribuyeron lamentablemente a incrementar los daños.

La colisión directa entre dos placas continentales da lugar a procesos muy complejos de formación de montañas (u orogénicos); las colisiones hacen que pequeños continentes se ensamblen para formar masas continentales de mayores dimensiones. Dos placas continentales se desplazan lentamente la una hacia la otra; las separa un océano o una cuenca sedimentaria subsidente en la que se han acumulado no sólo los sedimentos

erosionados en los continentes adyacentes sino también calizas y restos fósiles de los animales y plantas que, en un momento u otro, poblaron los mares que bañan ambas placas. A medida que las placas se van acercando, los sedimentos acumulados en la cuenca que las separa van siendo comprimidos, plegados, deformados como masilla en una tenaza. Las elevadas presiones involucradas en el proceso generan calor. Este calor provoca la alteración química de los sedimentos, o incluso su fusión; en este caso, los sedimentos fundidos ascienden hacia la superficie como si intentasen recuperar su posición original; sólo que esta vez conducen a una actividad volcánica. Si la presión va dirigida desde una placa móvil hacia otra placa relativamente estática, pueden desarrollarse grandes pliegues en los sedimentos de los fondos oceánicos, unas unidades pueden solapar y ser solapadas a su vez por otras dando lugar, finalmente, a la formación de montañas jóvenes en la placa estática. Si la presión sigue incrementándose o persiste en el tiempo, los pliegues pueden quedar arrancados de cuajo y deslizarse a lo largo de grandes distancias constituyendo las denominadas *nappes* o mantos de corrimiento. Mientras todo eso sucede, la erosión ya está actuando sobre las montañas recién formadas; eso puede provocar que los sedimentos erosionados en el frente de una nappe se acumulen al pie de la misma, en donde serán cabalgados por la propia nappe padre que a su vez puede cabalgar o ser cabalgada por otras nappes. Lo que acabamos de explicar no es sino una tosca simplificación de lo que en realidad ocurre, pero sirve para que nos demos cuenta de cómo se han formado montañas como los Alpes y el Himalaya. Eventualmente, las dos placas originalmente separadas pueden quedar fuertemente soldadas a lo largo de la antigua línea de colisión. Al cabo de millones de años, cuando la erosión ya haya destruido por completo las cadenas montañosas, la línea de sutura aún será claramente visible como un cinturón que forma una gran alineación estructural que cruza de parte a parte la nueva placa continental.

Por tanto, la importancia de los sistemas montañosos para dilucidar las complejidades de la tectónica de placas es grande. Las colisiones entre placas provocan la formación de montañas; en consecuencia, los sistemas montañosos nos indican dónde están ocurriendo actualmente colisiones entre placas y dónde esas colisiones ocurrieron en el pasado. El desmembramiento del supercontinente Pangea, y el posterior y paulatino alejamiento de los fragmentos resultantes, constituye la respuesta global de la Tierra al régimen de la tectónica de placas imperante en la misma durante los últimos 200 millones de años. Las cadenas montañosas de la costa occidental de Sudamérica y Norteamérica, de las Aleutianas y de Kamchatka, del Japón y de Indonesia, de Sumatra y Birmania, del Himalaya y del Oriente Medio, y también los Alpes, son consecuencia directa del desmem-

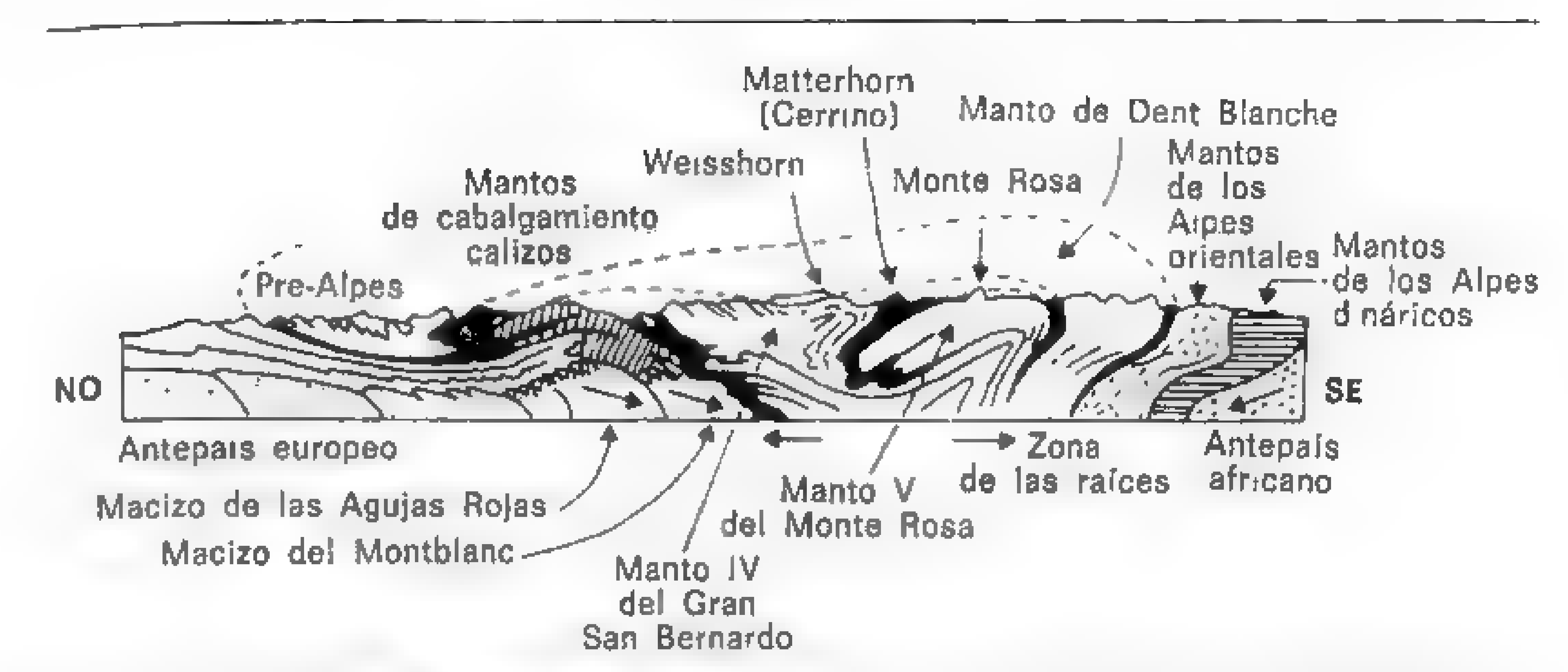


Fig. 13. Corte geológico esquemático de los Alpes, en el que se muestra cómo esa cordillera se formó a consecuencia de la compresión y la deformación de rocas relativamente más jóvenes y menos consistentes entre las antiguas y rígidas placas continentales de África y Europa. A medida que la deformación hacia arriba de esas rocas jóvenes iba progresando, la influencia de la gravedad provocó numerosos deslizamientos que dieron lugar a los denominados mantos de corrimiento o *nappes*. En los apilamientos de nappes se producen inversiones de la secuencia estratigráfica, ya que unidades constituidas por rocas más antiguas se deslizan encima de unidades constituidas por rocas relativamente más jóvenes.

bramiento del Pangea. En general, la formación de todas esas montañas se produjo en los márgenes de los océanos que, a lo largo de los tiempos mesozoicos y cenozoicos, se iban cerrando gradualmente como consecuencia de los procesos de la deriva continental y de la expansión de los fondos oceánicos.

Naturalmente, en la actualidad se están todavía formando montañas. En las Azores se está generando nueva corteza oceánica coincidiendo con un límite constructivo entre dos grandes placas. Prolongándose hacia el este de las Azores existe una gran falla transformante activa. En el sur de Portugal, la placa africana está ejerciendo presión contra la placa eurasiática. Fue precisamente la interacción o la acción combinada de todas esas fuerzas y elementos estructurales la que provocó el gran terremoto de Lisboa del año 1755; en esa región, no había habido con anterioridad ninguna sacudida que permitiese prever lo que iba a ocurrir. La falla responsable de ese terremoto ha sido localizada recientemente mediante cámaras fotográficas submarinas; a lo largo de la misma se han observado desplazamientos del orden de varios decímetros. El fondo del Mediterráneo está aún en movimiento: el fondo de la cuenca occidental está en franco proceso de reducción debido a las intensas presiones generadas en el área por la coli-

sión continua en las placas africana, que se desplaza hacia el norte, y eurasiática. Por contra, en la cuenca oriental el fondo del Mediterráneo está creciendo, provocando vulcanismo y terremotos, siendo uno de sus ejemplos más representativos la destrucción de la isla volcánica de Santorín en una erupción volcánica, hace treinta y cuatro siglos. En Chipre hay numerosas evidencias del levantamiento de los fondos del Mediterráneo oriental como consecuencia de las presiones entre placas. Algunas de las rocas del Macizo de Troodos, al sur de Chipre, están constituidas por materiales, ricos en hierro y magnesio, procedentes del manto y que, normalmente, sólo deberían hallarse a profundidades de doce kilómetros o más —en las regiones del manto superior que infrayacen por debajo de la corteza oceánica—. Por eso, puede decirse que Chipre es potencialmente otra gran cadena alpina, que alcanzará su pleno desarrollo coincidiendo con el estrangulamiento definitivo del Mediterráneo por las placas africana y eurasiática. Podemos, pues, afirmar que las antiguas cadenas montañosas se formaron en los lugares en que dos o más placas colisionaron y que el proceso debió ser parecido al que podemos observar actualmente en Chipre y en el Mediterráneo oriental, en donde hay también masas deslizadas de rocas oceánicas previamente levantadas. La presencia de rocas suboceánicas, como las de las Montañas de Troodos, en un antiguo cinturón móvil es indicativo de que en ese lugar se produjo una colisión entre placas.

Desde hace muchos años se sabe que en algunas zonas de los Alpes, del Himalaya y de la Cordillera Occidental de los Andes hay grandes masas deslizadas discontinuas constituidas por rocas ígneas básicas intensamente deformadas y alteradas. Harry Hess ya interpretó su verdadero significado en el año 1955. Esas *ofiolitas*, tal y como se las ha llamado, son claramente análogas a las rocas del sur de Chipre y, por tanto, deben ser interpretadas como restos de antiguos fondos oceánicos atrapados en pliegues de montañas que se han formado como consecuencia de colisiones entre placas. Actualmente, Europa y África están colisionando a lo largo de los Alpes y del Mediterráneo; en algún momento del futuro geológico, uno y otro continentes se soldarán y en lugar del Mediterráneo sólo habrá un complejo sistema de montañas plegadas. Lo mismo ocurre en el subcontinente indio, cuya línea de soldadura con el resto de Asia es ni más ni menos que el macizo del Himalaya. Sin embargo, en términos geológicos, ambos son cinturones muy móviles.

Para averiguar la historia de la formación del propio supercontinente Pangea, es necesario examinar los sistemas montañosos más antiguos de la Tierra. Uno de esos sistemas son los *Caledónides*, un antiguo cinturón orogénico que se desarrolló desde finales del Precámbrico hasta el Devónico y cuyos restos pueden ser reconocidos actualmente en el este de Groenlandia, en Noruega, al oeste de Inglaterra, en Terranova y, ya más hacia el sudoeste, a lo largo del este de los Estados Unidos hasta el Caribe. En Terranova, por ejemplo, y entre otras rocas más antiguas, hay afloramientos de ofiolitas que pueden ser comparadas directamente con las rocas oceánicas de Chipre: todas ellas son ricas en hierro y magnesio, y contienen elevadas cantidades de cobre; en las mismas hay también inclusiones de rocas volcánicas y niveles de origen intrusivo; evidentemente, ambas han debido formarse bajo condiciones muy semejantes. Los afloramientos de ofiolitas son muy abundantes en todo el sistema caledónide; eso puede ser interpretado como indicativo de que el cinturón caledoniano representa el cierre de un antiguo océano, seguido por la colisión final y el ensamblamiento de dos placas continentales previamente separadas.

Observaciones similares permiten a los geólogos localizar otras antiguas suturas. Los Urales, que atraviesan Rusia de norte a sur, contienen un elevado número de masas alóctonas de rocas oceánicas, iguales que las que hay en Chipre y en Terranova. En los Urales, esas rocas oceánicas alteradas están distribuidas a lo largo de varias zonas paralelas al eje de la cadena: señalan la línea según la cual Siberia chocó con Europa hace unos 250 millones de años. El sistema *varisco* es otro de los antiguos cinturones montañosos formados a causa de las colisiones entre placas; las montañas variscas cruzaban Europa de este a oeste y, antes de la apertura del océano Atlántico, se unían a los Appalaches cerca de la actual Nueva York.

Si consideramos que esas antiguas líneas de sutura representan los límites entre antiguos continentes y océanos, podemos empezar a imaginar cómo era el mundo antes del Pangea. Es probable que a finales del Precámbrico existiese un gran supercontinente linear. Al parecer existía un núcleo constituido por Sudamérica, África, la Antártida, la India y Australia, todos ellos ya dispuestos según la distribución que tendrían en el momento de formarse el Pangea, al que se le unió Norteamérica a través de Arabia; al mismo tiempo, el protocontinente norteamericano estaba conectado con Eurasia a través de Groenlandia. En el Ordovícico inferior, hace unos 500 millones de años, la deriva continental ya había separado Europa de Norteamérica, surgiendo un pequeño océano entre ambos. Siberia se había alejado algo de Europa y la separación de Norteamérica respecto al núcleo del Pangea había estado acompañada por una rotación que aproximó Australia, la India, Arabia y el cuerno de África a Siberia. El examen de las rocas sedimentarias que se acumularon durante esa época en diversas partes del mundo permite a los geólogos deducir las antiguas posiciones de los continentes respecto a los polos, el ecuador y los cinturones climáticos existentes por aquel entonces. La presencia de fósiles característicos de ambientes tropicales en las calizas de Norteamérica y Europa indica que esos conti-

nentes estaban cerca del ecuador; por otra parte, una serie de depósitos glaciares hallada en el Sahara sugiere que esa parte de África debió estar muy cerca del Polo Sur en aquellos momentos

El pequeño océano que se había formado entre Norteamérica y Europa tuvo una vida corta. Su cierre conllevó la consunción de la corteza oceánica en zonas de subducción situadas a ambos lados del mismo: esas zonas de subducción estaban asociadas con fosas oceánicas profundas y arcos de islas volcánicas. En el Devónico, hace unos 390 millones de años, ambos continentes ya se habían fusionado de nuevo mediante la línea de sutura conocida actualmente bajo el nombre de sistema caledónide; esa línea pasaba por el este de Groenlandia, Noruega, Inglaterra y Terranova. La prosecución de la deriva continental condujo a África, Sudamérica y al resto del núcleo del Pangea hacia el continente euro-norteamericano. La colisión entre esas dos grandes placas continentales se produjo hace unos 250 millones de años. La línea de sutura está representada por los Appalaches del Sur en Norteamérica y por el cinturón varisco en Europa, que pasa por el sur de Inglaterra, Francia, Bélgica y Alemania y llega hasta el Mar Negro. Mientras todo eso sucedía, Siberia se había ido desplazando hacia Europa, colisionando con la misma y dando lugar, tal y como ya hemos visto, a la formación de los Urales. Había nacido un nuevo supercontinente, pero distinto del anterior. Entre finales del Precámbrico y el Pérmico, los continentes se habían visto involucrados en un baile que tan pronto les separaba como volvía a reunirlos; ese baile debió haberse producido anteriormente muchísimas veces: los continentes seguían su ritmo desplazándose, una y otra vez, adelante y atrás, desde los polos al ecuador y vuelta a empezar.

Durante la colisión entre Europa y Norteamérica representada por los Caledónides, el norte de Escocia se mantuvo unido al resto de Inglaterra. Grandes masas de sedimentos marinos atrapadas entre los continentes fueron plegadas y levantadas para construir un cinturón montañoso que cruza Escocia, el norte de Inglaterra, Gales e Irlanda. Las rocas volcánicas ordovícicas que tanto contribuyen a dar su aspecto característico al paisaje del norte de Gales y de la Región de los Lagos, en Inglaterra, se formaron en arcos insulares asociados con los primeros episodios de la colisión entre placas. Muchos granitos se emplazaron en ese cinturón montañoso durante las últimas fases de esa orogenia. Después, la corteza terrestre volvió a romperse a lo largo de una nueva línea situada dentro de ese cinturón móvil; se produjeron movimientos laterales que facilitaron el reajuste de los contactos entre placas; esos reajustes debieron ir acompañados, sin duda, por grandes terremotos. Esa línea de fractura aún existe: actualmente está ocupada por el Lago Ness y por el Gran Glen. De vez en cuando aún se producen terremotos en esa falla, la cual muchísimo tiempo atrás debió ser

algo parecido al actual sistema de fallas transformantes de California. El desplazamiento total sufrido por la corteza a lo largo del Gran Glen es del orden de unos 100 kilómetros.

La formación del Pangea tocaba a su fin: Inglaterra se hallaba justo en su centro, mientras que Norteamérica y buena parte de Europa estaban situadas en los trópicos. Hacía muy poco que la vida, originada en el mar, había empezado a colonizar los frondosos bosques pantanosos que se desarrollaron a lo largo de las regiones costeras deltaicas. Durante la formación de los Appalaches del Sur y de las Montañas Variscas, los sedimentos y restos orgánicos acumulados en esos pantanos quedaron enterrados y fueron transformados en carbón. En muchos lugares, las rocas con vetas de carbón fueron cubiertas por depósitos de arena y sal, tal y como ocurrió en el norte de Inglaterra y en Europa occidental en el Permo-Triásico. Gracias a la presencia de esos depósitos sabemos que extensas regiones del interior de aquel supercontinente estaban caracterizadas por un clima desértico muy parecido al actualmente imperante en el Sahara.

El Pangea empezó a desmembrarse casi inmediatamente después de quedar definitivamente constituido: la ruptura empezó entre Sudamérica y África, hace unos 200 millones de años, durante el Triásico. En el hemisferio septentrional se separaron Norteamérica y Sudamérica y luego la hendidura separó a África. Simultáneamente, la Antártida se separó del continente africano, arrastrando consigo a la India y a Australia. En la primera línea de fractura que se había formado se desarrolló la dorsal expansiva medio-atlántica, la cual empujaba a España y Francia en dirección opuesta a la que se desplazaba Norteamérica; esa misma dorsal separó Inglaterra del Canadá; en cambio, Groenlandia y Europa no se separaron hasta hace unos 60 millones de años. Aún más tarde, y como fruto directo de la actividad volcánica de la dorsal, nació Islandia. La India, la placa cortical que más rápidamente se ha movido, se desgajó de África y empezó a moverse hacia el noroeste hasta que colisionó con Asia, dando lugar a la formación del Himalaya y de la meseta del Tibet. La dorsal medio-oceánica ganó terreno muy pronto y del Atlántico pasó al océano Índico rodeando El Cabo y separando Australia de la Antártida. Una rama de la dorsal medio-oceánica del océano Índico se encargó de separar Madagascar del resto de África; esa misma rama se prolongó, aunque no excesivamente, hacia el interior del continente convertida en un valle de rift. Otra rama de esa misma dorsal se introdujo entre África y Asia, creando el Mar Rojo y el valle del Mar Muerto; su existencia se manifiesta hoy en día por la expansión del Mar Rojo, que tiende a cerrar lentamente el Golfo de Omán provocando frecuentes terremotos en Irán y en Turquía. Fue precisamente ese movimiento hacia el norte lo que dio lugar a los pliegues de las montañas del Zagros y a

la propia formación del Irán. Durante la ruptura del Pangea, el Tethys —un gran entrante oceánico situado en el margen oriental del supercontinente— empezó a cerrarse. Hace sesenta y cinco millones de años, África tomó contacto con Eurasia; entre ambos continentes quedó un brazo del antiguo Tethys que sería el antecesor directo de los actuales Mediterráneo y Golfo de Omán. Sin embargo, y a lo largo de los últimos 60 millones de años, la expansión del Mar Rojo tiende a cerrar ese brazo.

Hace unos 135 millones de años, un ramal al sur de la dorsal medio-atlántica penetró en el Pacífico. Se sabe muy poco acerca de los detalles de este evento, pero el mismo pudo haber tenido una gran importancia en el nacimiento de la dorsal del Pacífico Este, otra dorsal expansiva medio-oceánica que está empujando lentamente a las placas de Nazca y Cocos contra la placa americana. Los terremotos y volcanes de América Central y del Sur se deben precisamente a esos empujes generados en la dorsal del Pacífico Este. Es muy posible que durante la evolución de las dorsales expansivas post-pangeanas del Pacífico se haya producido el desmembramiento completo de una gran placa continental, llamada "la placa pacífica perdida", que estuvo tocando a Australia.

El siguiente cataclismo que afectó a Inglaterra se produjo después de la ruptura total del Pangea, cuando Italia chocó de frente contra Europa, pro-

Figs. 14, 15 y 16. Diagrama representativo del desmembramiento del supercontinente Pangea hace 200 millones de años. C = Arco del Caribe, S = Arco de Escocia. Un primitivo *rifting* a lo largo de la proto-dorsal medio-atlántica partió el Pangea en dos, Laurasia al norte y Gondwana al sur, hace 180 millones de años. Los actuales bloques continentales ya eran identificables hace 135 millones de años; en ese momento, África y Sudamérica empezaron a separarse y la India ya se había desgajado de la parte meridional de Gondwana y había iniciado su migración hacia el norte. 65 millones de años atrás, la mayoría de los continentes ya se habían separado; Norteamérica y Eurasia aún permanecían unidas, pero un *rifting* incipiente ya empezaba a separarlas. La India colisionó entonces con Asia, dando lugar a la formación del Himalaya; en la región mediterránea, unas colisiones similares dieron lugar a la formación de los Alpes. En el Caribe, las manifestaciones volcánicas provocaron la unión de Norteamérica y Sudamérica, mientras que el océano Atlántico continuaba ensanchándose a expensas del Pacífico. ▶

Asumiendo que los continentes sigan desplazándose según sus direcciones actuales y a las mismas velocidades con que lo hacen hoy en día, se pueden calcular sus posiciones aproximadas en diferentes momentos del futuro. Dentro de 50 millones de años, Norteamérica y Sudamérica se habrán separado, mientras que Australia habrá chocado con Nueva Guinea. La progresión del *rifting* a lo largo del valle del Rift africano hará que grandes segmentos de ese continente se desgajen del mismo; el desplazamiento continuado de África hacia Europa hará que España y Portugal sean empujados hacia el norte hasta colisionar con el sur de Inglaterra; este hecho irá acompañado por terremotos y vulcanismo en el mar de Irlanda. (M.A. = millones de años.)

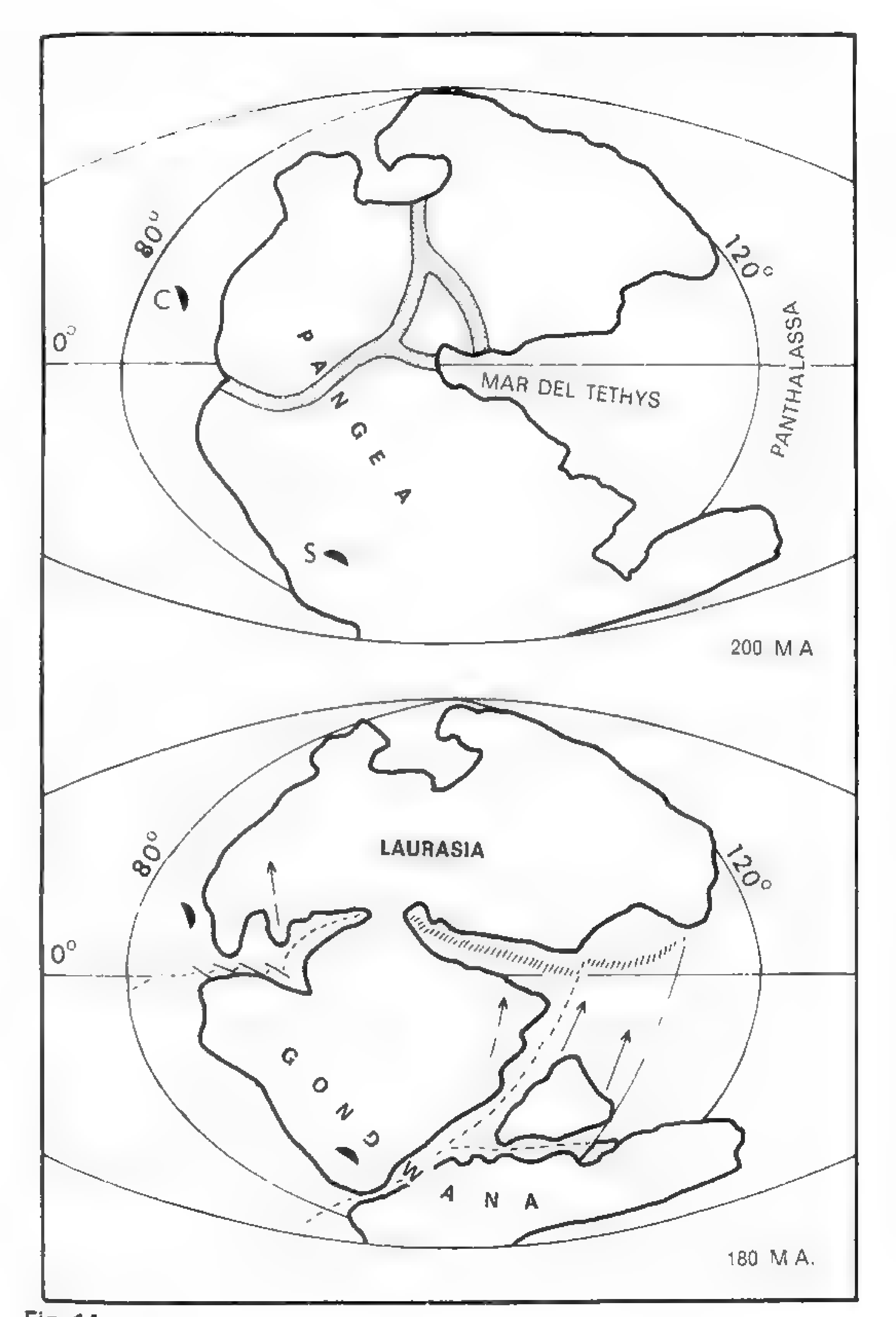


Fig. 14

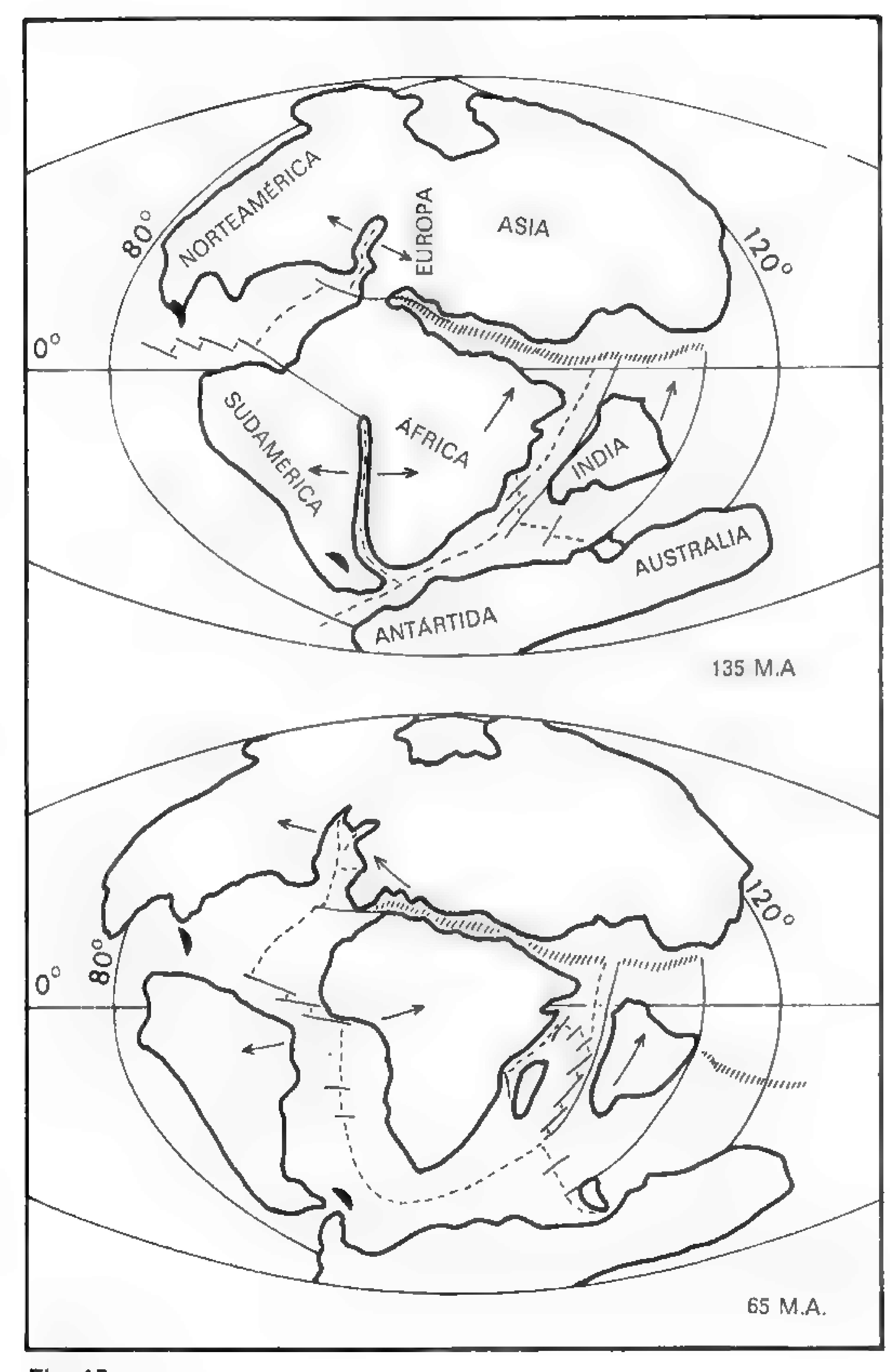

NORTEAMÉRICA
EUROPA
ASIA
80°
120°
0°
SUDAMÉRICA
ÁFRICA
INDIA
AUSTRALIA
ANTÁRTIDA
135 M.A
120°
0°
80°
65 M.A.

Fig. 15

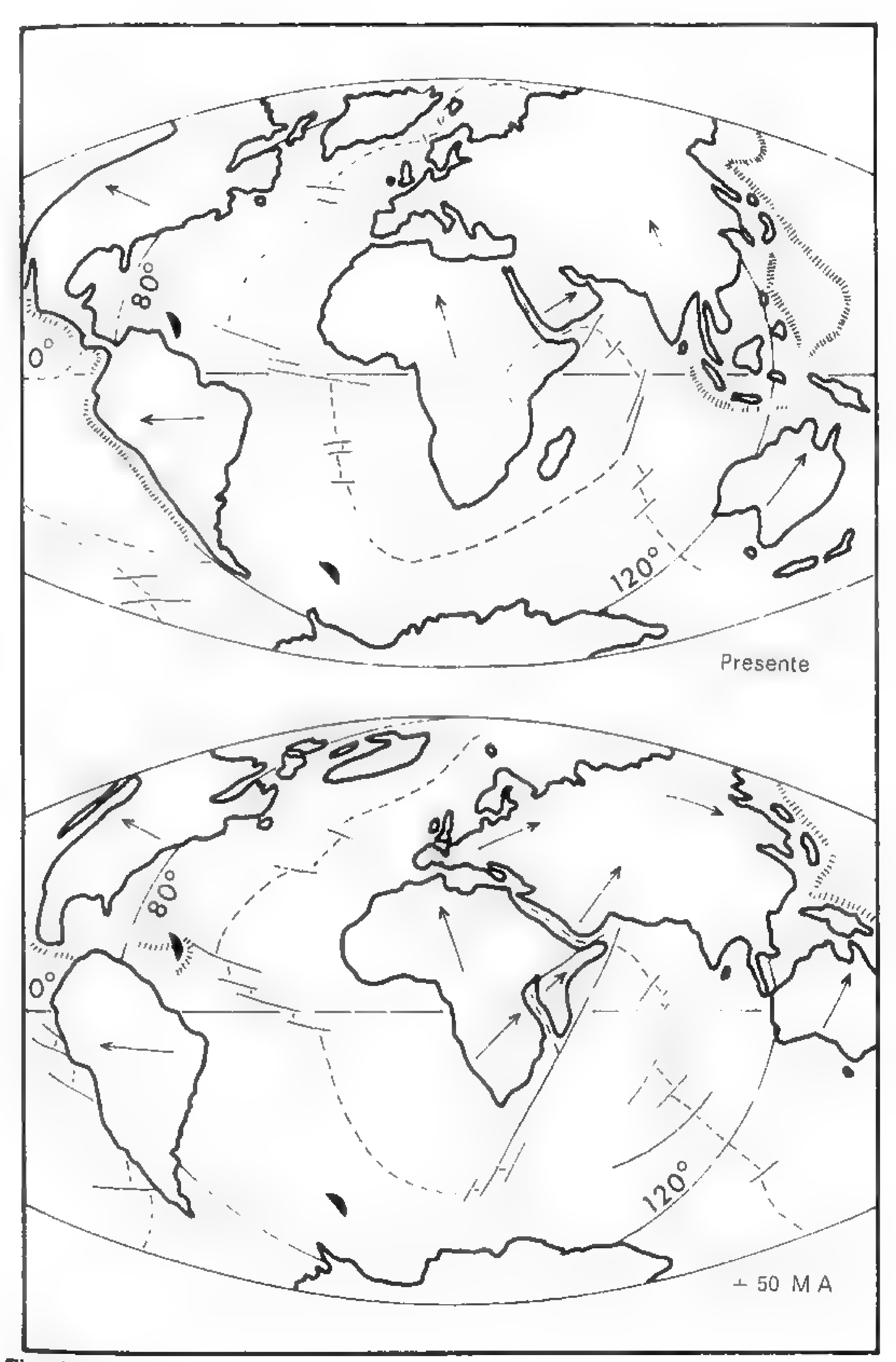

80°
0°
120°
Presente
80°
0°
120°
± 50 M A

Fig. 16

vocando la formación de los Alpes. Durante ese evento, Francia protegía a Inglaterra como una almohadilla, pero, sin embargo, los efectos de esa colisión se dejaron sentir claramente en el sudeste de Inglaterra, en la Isla de Wight, los estratos fueron doblegados hasta la vertical; se produjeron plegamientos en las regiones de Londres y del Hampshire, mientras que en el Weald de Kent y Sussex se erigió una especie de enorme domo de creta, algo así como un coletazo de la formación de los Alpes, actualmente muy erosionado por los elementos.

El último elemento que ha modificado en gran manera el paisaje de Europa y Norteamérica ha tenido lugar más o menos durante el último millón de años, cuando el océano Ártico se enfrió hasta congelarse. Debido al exceso de precipitación nivosa respecto a las tasas de fusión y evaporación, se formaron glaciares que fueron progresando e invadiendo los territorios del hemisferio septentrional. Esa progresión de los hielos conllevó la excavación de valles glaciares y la acumulación de depósitos glaciares que quedaron expuestos al retirarse los hielos.

Hemos visto, por tanto, cómo la incesante danza de los continentes provoca choques entre las diversas placas continentales; a veces, éstas se sueldan y forman supercontinentes como el Pangea; en otras ocasiones, las fuerzas del interior de la Tierra provocan su fragmentación. El proceso de colisiones de destrucción de placas y creación de supercontinentes ha debido repetirse una y otra vez a lo largo de la historia de la Tierra. El hombre y su curiosidad insaciable han sido capaces, en el breve período de tiempo que llevan sobre la Tierra, de penetrar momentáneamente en los secretos de la tumultuosa historia de nuestro planeta tal como se desarrolló. Sabemos que prácticamente todos los fenómenos violentos que se producen en la Tierra están relacionados de una u otra manera con la expansión de los fondos oceánicos, la deriva continental y la tectónica de placas. El crecimiento de las dorsales oceánicas expansivas hace variar el volumen de las cuencas oceánicas; el movimiento de las placas es directamente responsable de los volcanes y los subsiguientes terremotos; ambos procesos provocan levantamientos y hundimientos en la superficie terrestre, facilitando la inmersión de extensas regiones o convirtiéndolas en desiertos interiores. El movimiento de los continentes les conduce inexorablemente hacia las regiones polares y, por tanto, hacia crudas edades de hielo. En pocas palabras, la deriva continental crea y destruye la tierra firme, y la expone a grandes cambios climáticos.

Por muy académico que pueda parecer el estudio de los movimientos de las placas corticales, su importancia no debe ser despreciada. Ayuda a buscar reservas de combustibles fósiles y de todo tipo de recursos naturales de valor económico; sirve para darnos una visión esclarecedora para comprender y aprender a controlar las catástrofes naturales, con la excepción de aquellas que se deben al bombardeo extraterrestre. Por último, nos permite prever el futuro. Conociendo la dirección y la velocidad del movimiento de las placas se puede calcular cuáles serán sus posiciones futuras. Después del próximo período glacial en el hemisferio septentrional, el ensanchamiento del Atlántico provocará una colisión más activa entre África y Europa; a medida que el Mediterráneo se irá cerrando, se formarán nuevos pliegues en la región. Tal vez la Península Ibérica se desgaje de Europa y se dirija hacia el noroeste provocando terremotos y erupciones volcánicas en las inmediaciones del Canal y el sur del Mar de Irlanda. La costa oriental de Inglaterra continuará subsidiendo, provocando eventualmente la inundación de la Cuenca de Londres y de toda el Anglia oriental. Actualmente esa región se está ya hundiendo lenta pero irremediablemente respecto al nivel del mar. Probablemente, Norteamérica se separará de Sudamérica a la altura del arco insular del Caribe, el cual quizás resulte fragmentado. Groenlandia será arrastrada hacia el oeste por el Canadá. El Canadá quizás colisione con Siberia, mientras que Australia se desplazará hacia el norte, acercándose más a Nueva Guinea; la India tal vez se incorpore a este nuevo bloque continental procedente del oeste. Un gran fragmento del este de África se desgajará del resto del continente a causa del progresivo ensanchamiento del Valle del Rift; se formará así una subplaca del este de África. Por otra parte, el ensanchamiento del Mar Rojo provocará que éste se abra hacia el cada vez más estrecho Mar Mediterráneo. El océano Atlántico se expandirá a expensas del océano Pacífico, el cual se contraerá. Llegará un momento en que el Pacífico se convertirá en la sede de múltiples colisiones y en él se formará aún un nuevo supercontinente.

No podemos decir si el hombre, tal y como le conocemos actualmente, verá algún día convertirse en realidad esas predicciones. Sin embargo, las probabilidades de que la raza humana sea aniquilada mucho antes de que todo eso ocurra son demasiado elevadas

IV. LA INESTABILIDAD DE LA TIERRA

"Aprende ahora la verdadera naturaleza de los terremotos
Ante todo debes comprender que la Tierra,
desde sus regiones más bajas hasta las más altas,
está plagada por todas partes de cuevas de aire y lleva
en su seno una infinidad de mares, golfos, precipicios
y acantilados profundos. Debes también concebir
que debajo de la corteza terrestre existen
muchos ríos subterráneos, cuyas aguas, mezcladas con
rocas sumergidas, se deslizan con torrencial potencia
Pues los simples hechos requerían que la Tierra
tuviese la misma naturaleza por todas partes
Con todos esos elementos alojados y sepultados
en sus entrañas, la Tierra por encima tiembla con el fragor
de las masas removidas cuando las enormes cavernas
se derrumban allá en lo más profundo a través del tiempo.
Montañas enteras se desmoronan y se desencadenan
repentinos fragores bajo ese violento impacto
que lo conmueve todo a lo largo y a lo ancho."

Lucrecio: poema sobre *"La naturaleza del Universo"*
dirigido a Gayo Memmio en el año 55 a.C.

"La ciudad se agita, la Tierra se inunda de sangre."

C. M. Verschogle, *El Liberador*

Eran las 5.13 horas del día 18 de abril de 1906 cuando San Francisco se vio sacudido por una terrible onda sísmica. Los temblores de tierra persistieron durante menos de 48 segundos, pero los daños causados en la ciudad y sus alrededores fueron tan devastadores que aún hoy en día se habla del "gran terremoto de San Francisco del año 1906". El impacto emo-

cional también fue tremendo: la directora de un colegio de niñas londinense —que se hallaba visitando San Francisco cuando el terremoto ocurrió y que se salvó de la muerte gracias a que el pórtico de entrada de la Opera House la protegió de la lluvia de cascotes— estuvo elevando cada día durante 32 años plegarias al Señor por haberla salvado. El imponente City Hall, del cual los lugareños se sentían justificadamente orgullosos, quedó convertido en un montón de ruinas (lámina 8). Los colosales pilares sobre los que se apoyaban los arcos de la entrada quedaron tumbados sobre la avenida, más allá de las vías del tranvía: los miles de toneladas de ladrillos y cascotes resultantes de la destrucción del edificio formaban una caótica montaña de grandes proporciones. El ala oeste del edificio quedó convertida en una masa informe; en su fachada norte sólo quedó en pie una especie de marco de acero. Todos los hoteles, teatros, fábricas y oficinas de la ciudad quedaron dañados y destruidos de forma semejante. El "State Insane Asylum", en Agnew, se derrumbó; el superintendente murió y muchos de los miembros de su equipo sufrieron graves heridas. El periódico de San Francisco *Call-Chronicle-Examiner* del día 19 de abril notificaba que 200 dementes habían escapado del manicomio y estaban vagando por los alrededores.

Muchos de los antiguos edificios de madera, que daban su imagen característica a buena parte del San Francisco del año 1906, resistieron las sacudidas del terremoto con más flexibilidad que las estructuras de acero y piedra: en consecuencia, los daños que sufrieron fueron sensiblemente menores. Sin embargo, postreros movimientos en la falla de San Andrés —responsable principal del terremoto— rompieron las tuberías principales de conducción de aguas, provocando el colapso de los servicios de extinción de incendios de toda la ciudad. Tal situación propició la rápida propagación de pequeños incendios que se habían declarado en las proximidades de estufas volcadas, cables eléctricos cortados, tuberías de gas rotas, chimeneas medio derruidas, etc. Esos incendios afectaron especialmente a las construcciones de madera. El "Mechanics Pavilion", por ejemplo, un gran edificio de madera que cubría toda una manzana, no resultó dañado por el terremoto; por tal motivo, fue transformado en un improvisado hospital en el que se alojaban 300 heridos. Sin embargo, muy pronto los fuegos incontrolados se propagaron por toda la ciudad. El "Mechanics Pavilion" tuvo que ser evacuado urgentemente y, a pesar de todos los esfuerzos, la nave ardió como la tea: al cabo de quince minutos ya no era más que un montón de humeantes cenizas. Durante todo el día siguiente el fuego avanzó en todas direcciones. En la mañana del día 19 de abril gran parte de la ciudad había sido arrasada por el fuego. Esa segunda catástrofe, los incendios, se acumuló a la destrucción causada por el propio terremoto.

En la parte baja de la ciudad todo eran ruinas, no quedaba en pie ni un solo edificio. Almacenes, fábricas, mercancías, zonas residenciales, todo estaba destruido. La confusión reinaba por doquier. Por todas partes no había más que muerte y destrucción. Las mujeres sollozaban y los hombres hurgaban entre los escombros intentando salvar del holocausto todo lo que fuese posible. Miles de personas perdieron sus hogares; muchos, provistos de mantas y de algunas provisiones, buscaron cobijo en el "Golden Gate Park" y en la playa. Se implantó el toque de queda a partir de las nueve de la noche. Se enviaron centenares de soldados para ayudar a la policía y a los bomberos. La rotura de las tuberías de conducción de aguas provocó la inundación de las estaciones de bombeo; ante tal situación, los bomberos se vieron obligados a utilizar muchas toneladas de dinamita para controlar los incendios declarados en las zonas con mayor concentración de edificios. Las explosiones sirvieron, en la medida de lo posible, para evitar la propagación de las llamas hacia otras zonas.

El terremoto de 1906 estaba centrado en la Falla de San Andrés, en un punto en que la misma pasa justo al oeste del centro de San Francisco, cerca del actual emplazamiento del famoso puente de Golden Gate. Se considera que la magnitud del terremoto estuvo próxima a los 8,3 grados de la escala de Richter (véase la página 107). Murieron unas 700 personas. El importe de los daños causados osciló entre 350 y 1.000 millones de dólares de la época; gran parte de los mismos se debieron a los incendios que siguieron al terremoto.

Las fracturas del suelo eran visibles en la Falla de San Andrés a lo largo de 360 kilómetros, desde San Juan Bautista hasta Punta Arena, en el norte de California —lugar este último en que la falla se adentra en el mar— y a lo largo de otros 72 kilómetros más al norte, en Shelter Cove, en el país de Humboldt, en donde el desplazamiento vertical entre uno y otro labio de la falla oscilaba entre 2 y 3 metros. El desplazamiento de las filas de árboles y de las vallas indicaba que cerca de Punta Arena se produjo un desplazamiento lateral diestro de hasta 4 metros. En la ciudad, la mayor ruptura del suelo se produjo cerca de la costa y en las zonas edificadas sobre los sedimentos blandos de la Bahía o sobre rellenos artificiales. Después del terremoto se observó que muchos elementos transversales a la Falla de San Andrés, y previamente alineados en línea recta, se habían curvado. El sismólogo americano F. H. Reid efectuó detalladas observaciones acerca de esos efectos, lo cual le llevó a formular la llamada *teoría del rebote elástico* de los terremotos. Reid mostró que la fuente de energía de los terremotos tectónicos (véase la página 102) es la energía potencial almacenada en la corteza durante su deformación gradual cuando está sometida a esfuerzos.

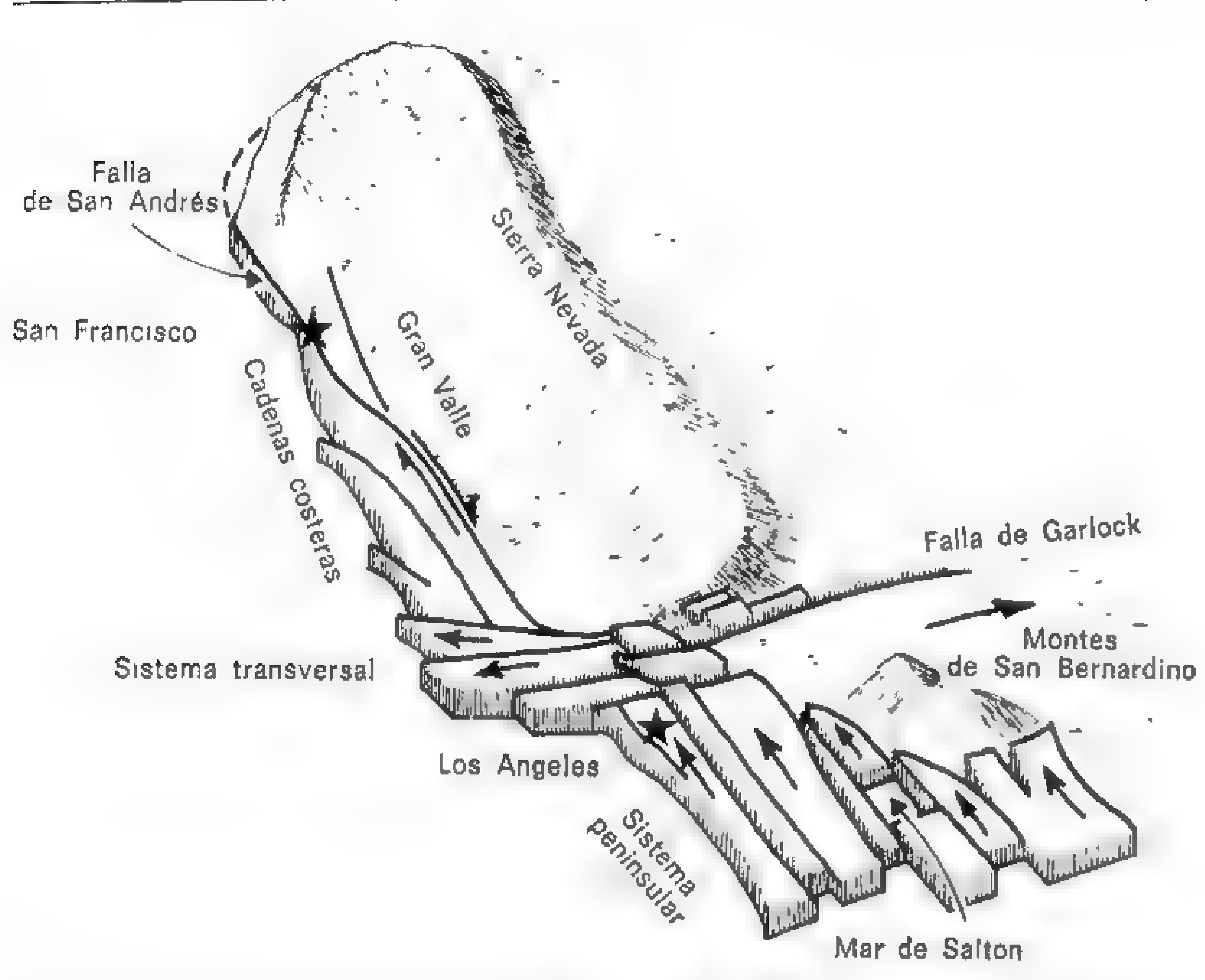


Fig. 17. Diagrama ilustrativo de la gran complejidad del sistema de Falla de San Andrés, en California. Al norte de la falla de Garlock, el complejo sistema de bloques situado al sur de la misma es sustituido por una serie de fallas en escalón que se van desplazando en sentido horario.

Cuando los esfuerzos elásticos acumulados superan la competencia de las rocas, se produce una fractura; los bloques afectados por la misma de cada lado de la línea se inclinan en busca de un nuevo equilibrio. El movimiento relativo de los bloques desencadena un terremoto y la energía almacenada en la corteza se propaga en todas las direcciones en forma de ondas elásticas desplazándose a través de la capa sólida de la Tierra. Reid pudo demostrar que el terremoto de 1906 fue causado por la falla, y no al revés.

Ante la pregunta "¿Pueden producirse en el futuro nuevos terremotos en San Francisco tan violentos como el del año 1906?", la respuesta inequívoca debe ser "sí". La BBC-TV podría muy bien haber puesto por título "La ciudad que va a morir" a su programa sobre el riesgo sísmico en California del año 1972. La Falla de San Andrés forma parte de un sistema de grandes

fallas a lo largo de las cuales se deslizan lenta e inexorablemente, la una respecto a la otra, dos de las más grandes fallas corticales. En las frágiles rocas de la corteza superior estos deslizamientos suelen desencadenar violentas sacudidas sísmicas. A menos que hallemos la manera de lubricar los planos de deslizamiento para así transformar las violentas sacudidas en suaves y graduales roces, la ciudad de San Francisco estará permanentemente expuesta a futuros grandes terremotos, tan inevitablemente como el día sucede a la noche.

El gran terremoto de Alaska ocurrido el día de Viernes Santo del año 1964 ha sido uno de los más importantes de los últimos tiempos. Alcanzó 8.6 grados en la escala de Richter. Se produjo aproximadamente a las cinco y media de la tarde del día 27 de marzo; por fortuna, su epicentro estaba situado en una zona montañosa escasamente poblada, al norte del Golfo del Príncipe Guillermo, y a tan sólo 40 millas al oeste de la terminal del oleoducto transalaskiano, en Valdez; el terremoto provocó directamente la muerte de 114 personas, mientras que los tsunamis generados por el mismo provocaron la muerte de otras muchas (véase la página 94). La violencia de la sacudida, que se prolongó por espacio de unos cuatro minutos, desencadenó numerosos corrimientos de tierras y aludes en toda la región meridional del centro de Alaska; también originó la destrucción generalizada de instalaciones portuarias, tendidos del ferrocarril, carreteras, puentes y edificios de todo tipo. Los movimientos de subsidencia fueron especialmente significativos en los lugares en que el subsuelo estaba constituido por sedimentos no consolidados.

La principal ciudad afectada fue Anchorage, a 160 kilómetros del epicentro. En Anchorage pudo verse cómo algunos edificios de hormigón avanzaban contra otros antes de que todos ellos empezasen a derrumbarse. Edificios enteros, árboles y postes se desplazaban solidariamente en dirección este-oeste; los objetos móviles empezaron a ir de un lado a otro de las habitaciones, mientras que sus ocupantes experimentaron una fuerte sensación de dar vueltas. Tal y como ya había ocurrido antes en San Francisco, las construcciones con armazón de madera resistieron mejor al terremoto que las de hormigón. En uno de los suburbios residenciales de Anchorage, conocido como "Turnagain Heights", situado en una colina sobre el Cook Inlet, las arcillas y los limos del subsuelo se fluidificaron debido al terremoto y produjeron un gran deslizamiento que arrastró consigo a las casas del lugar a lo largo de unos 500 metros en dirección al mar. Se abrieron profundas grietas que engulleron casas, coches, árboles y personas. Por todo Anchorage las calles y las carreteras estaban rotas y cubiertas de bloques volcados.

En conjunto, un total de 130.000 kilómetros cuadrados de territorio fueron levantados o hundidos algunos metros, según las zonas, a causa de esos movimientos sísmicos. Los muelles de Córdova se levantaron más de tres metros respecto a su altura anterior con relación al mar. Al sudoeste de Córdova y Valdez se desarrolló una banda en dirección noreste, y de unos 160 kilómetros de ancho y 800 de largo, que experimentó un notable alzamiento. Al noroeste se hundió una franja de terreno de dimensiones parecidas orientada hacia el sudoeste, desde Anchorage hasta Homer y la Isla de Kodiak

Quizás el aspecto más impresionante del terremoto del año 1964 en Alaska fueron las grandes olas que lo acompañaron. Las aguas del golfo del Príncipe Guillermo y del golfo de Alaska se vieron tan intensamente afectadas por el repentino desplazamiento vertical de las aguas del océano que dieron lugar a la formación de olas de origen sísmico que se propagaron a través de todo el Pacífico Norte. En tierra, lagos tan alejados como los de Florida experimentaron *seiches* o secas, oscilaciones rítmicas de sus aguas debidas al paso de las ondas sísmicas por el subsuelo. En el puerto de Valdez, a 80 kilómetros del epicentro, olas gigantescas barrieron toda la costa. Pocos segundos después del inicio del terremoto, el mar retrocedió y el muelle se partió en dos; en su retroceso, las aguas arrastraron algunos almacenes y numerosos objetos movibles. En el muelle había unas 30 personas contemplando un buque mercante en dificultades; cuando el muelle se partió, hombres, mujeres y niños se tambalearon mientras buscaban algún sitio donde agarrarse. Al cabo de unos instantes, una gran ola empezó a avanzar hacia la costa. El vapor *Chena*, de 120 metros de eslora, fue levantado unos 8 metros como un cascarón de nuez con la proa por encima del muelle; después cayó y golpeó el fondo, volvió a ser impulsado hacia delante, y volvió a caer de nuevo hasta quedar, por último, posado sobre la playa, escorado unos 50°. Dos hombres murieron aplastados por algunos de los bultos que transportaba el buque, y otro murió de un ataque al corazón. Cuando se estrelló contra el litoral, el tsunami medía unos 8 metros de alto por encima del muelle; a su paso, todas las estructuras e instalaciones quedaron destruidas, los edificios quedaron convertidos en astillas y los camiones, coches y vagonetas, en masas deformes de metal. Una segunda ola marina que transportaba gran cantidad de restos barrió el litoral diez minutos después de la primera. Entre una ola y otra hubo un intervalo de calma relativa que fue aprovechado por los equipos de rescate para buscar posibles supervivientes en la zona del muelle. No encontraron ni uno. A lo largo de toda la costa de Norteamérica, desde Alaska hasta California, las ciudades costeras sufrieron las consecuencias de este tsunami; muchas pequeñas embarcaciones quedaron encalladas tierra adentro, los rompeolas quedaron destruidos y los restos de la catástrofe flotaban por todas partes. En lugares tan alejados del epicentro como Crescent City, ya en California, también se produjeron víctimas; en esa ciudad, doce personas murieron cuando la ola marina, que aún medía 6 metros de alto, golpeó la costa, cinco horas después del inicio del terremoto en Alaska.

El mayor desastre en cuanto a vidas humanas causado por un terremoto ocurrió en China. Las más antiguas informaciones acerca de los terremotos chinos datan del año 1.100 a C.; a partir del año 780 a.C., en el período de la dinastía Chou, en el norte de China, tales informaciones ya son muy completas. A las cinco horas del día 23 de enero de 1556, un gran terremoto sacudió la densamente poblada región de Hsian, en la provincia de Shensi; la mayor parte de la gente vivían en cavernas que habían excavado ellos mismos en el blando loess que constituía las colinas de la zona (el loess es una roca muy blanda originada por la acumulación de partículas de polvo transportadas por el viento). Muchos hombres quedaron enterrados, mientras dormían, dentro de sus propias moradas cuando el violento mazazo de la catástrofe provocó que las cavernas en que vivían se hundieran sobre sus cabezas; por si eso no bastase, las inundaciones, el hambre, la enfermedad o, simplemente, la desesperación contribuyeron a incrementar aún más el número de víctimas. Los datos oficiales de la época reflejan un total de 830.000 muertes causadas directa o indirectamente por el terremoto.

China se ha visto afectada por otros muchos grandes terremotos. Por ejemplo, el 2 de septiembre de 1679 se produjo un terremoto, de magnitud 8 según la escala de Richter, centrado en la pequeña ciudad de San-ho, próxima a Pekín. Dicho terremoto causó daños en 121 ciudades chinas y provocó la muerte de muchos miles de personas. En 1966, una serie de terremotos de intensidad moderada, el mayor de los cuales alcanzó los 7,2 grados en la escala de Richter, determinó el colapso generalizado de las terrazas de cultivo de la zona de Shintai, así como el deslizamiento de los márgenes de los canales hacia el interior de los mismos; todo ello fue debido a la licuefacción del suelo inducida por los movimientos sísmicos. Shintai está a tan sólo unos 400 kilómetros al SSO de la región de Tientsin, la cual se vio azotada por los grandes terremotos de los días 27 y 28 de julio de 1976; en esos terremotos murieron más de medio millón de personas. Las cifras oficiales acerca del desastre del año 1976 aún no han sido hechas públicas; sin embargo, los datos provisionales de que disponemos nos permiten afirmar que éste ha sido el segundo gran terremoto de la historia

Los terremotos, con sus catastróficas secuelas, se han ido repitiendo incesantemente a lo largo de la historia de la Tierra y de la propia humanidad. En el mundo antiguo, los terremotos eran considerados como mani-

Tabla 4-1. Recopilación de los terremotos más catastróficos de los últimos 1.000 años

Año	Lugar	Víctimas estimadas
1038	Shensi, China	23 000
1057	Chihli, China	25.000
1138	Siria	100.000
1170	Sicilia	15.000
1268	Asia Menor	60.000
1290	Chihli, China	100.000
1293	Kamakura, Japón	30.000
1456	Napoles, Italia	30.000
1495	Nápoles, Italia	60.000
1531	Lisboa, Portugal	30.000
1556	Shensi, China	830.000
1619	Dughabad, Irán	800
1667	Shemaka, Caucasia	80.000
1668	Shensi, China	50.000
1692	Port Royal, Jamaica	sin datos
1693	Catania, Sicilia	60.000
1693	Nápoles, Italia	93.000
1707	Japón	4.900
1716	Argel	20.000
1730	Hokkaido, Japón	137.000
1731	Pekín, China	100.000
1737	Calcuta, India	300.000
1755	Norte de Persia	40.000
1755	Lisboa, Portugal (lámina 3)	30-70.000
1759	Baalbek, Siria	20.000
1783	Calabria, Italia	50.000
1797	Quito, Ecuador	41.000
1812	Caracas, Venezuela	20.000
1819	Cutch, India	1.800
1822	Alepo, Asia Menor	22.000
1828	Echigo, Japón	30.000
1847	Zenkoji, Japón	34.000
1868	Perú y Ecuador	25.000
1875	Venezuela y Colombia	16.000
1883	Ischia, Italia	2.300
1891	Mino-Owari, Japón	7.300
1896	Sanriku, Japón	27.000
1897	Assam, India	1.500
1905	Kangra, India	19 000
1906	Colombia	sin datos
1906	Formosa	1 250

Tabla 4-1. *(continuación)*

Año	Lugar	Víctimas estimadas
1906	Valparaíso, Chile	1.500
1906	San Francisco, EE.UU. (lámina 8)	700
1907	Kingston, Jamaica	1 400
1908	Mesina, Sicilia (lámina 10)	160 000
1915	Avezzano, Italia	30.000
1920	Kansu, China	200 000
1923	Tokio y Yokohama, Japón (láminas 9 y 17)	143.000
1927	Tango, Japón	3 000
1930	Apeninos, Italia	1.500
1932	Kansu, China	70.000
1935	Quetta, Beluchistán	60 000
1939	Concepción, Chile	30.000
1939	Erzincan, Turquía	40.000
1940	Bucarest, Rumania	1.000
1943	Tottori, Japón	1.400
1944	San Juan, Argentina	5.000
1946	Ancash, Perú	1.500
1946	Alaska y Hawai, EE.UU.	159
1948	Fuki, Japón	5 000
1948	Turkmenistán	3.000
1949	Ambato, Ecuador	6.000
1949	Tadzikistán	más de 10.000
1950	Assam, India	1.530
1951	San Salvador	4.000
1952	Tokaichi, Japón	600
1953	Noroeste de Turquía	1.200
1953	Islas Jónicas	500
1954	Orleansville, Norte de Argelia	1.600
1956	Kabul, Afganistán	2.000
1957	Norte de Irán	2.500
1957	Oeste de Irán	1.400
1957	Altai, Mongolia exterior	1 200
1957	Tessala, Grecia	ninguna
1960	Sur de Chile	5.700
1960	Agadir, Marruecos	14.000
1960	Lar, Irán	1.000
1962	Noroeste de Irán	14 000
1963	Barce, Libia	300
1963	Taiwan	100
1964	Anchorage, Alaska	114
1967	Caracas, Venezuela	266
1970	Perú	60.000

Tabla 4-1. *(continuacion)*

Año	Lugar	Víctimas estimadas
1972	Managua, Nicaragua	10.000
1972	Jahrom, Irán	5.044
1973	Puebla, México	500
1974	Norte de Pakistan	900
1975	Provincia de Lianoning, China	varios cientos
1975	Lice, Turquia	1.900
1976	Guatemala	23.000
1976	Udine, Italia	1.000
1976	Tientsin (Tangshan), China	650.000
1976	Mindanao, Filipinas	8.000
1976	Turquía oriental	4-10.000
1977	Bucarest, Rumania	1.541
1977	Irán centromeridional	348
1978	Tabas, Irán	más de 15 000
1985	Mexico	9.500
1988	Armenia	25.000
1990	Irán	50.000
1991	Noreste de Afganistán	2-400
1992	Turquía	570
1992	Nicaragua	170
1992	Egipto	550
1992	Indonesia	2.500
1993	India	más de 20.000

festaciones de "la ira de los dioses", a los cuales era necesario apaciguar mediante sacrificios, ritos comunales y plegarias dirigidas por los brujos o sacerdotes. En la mitología griega, Poseidón era el dios de los terremotos, uno de los dioses más poderosos, hermano de Zeus, y capaz de conmover la Tierra. Poseidón tenía una naturaleza hosca, pendenciera, codiciosa y adúltera. Cuando los tres hermanos, Zeus, Poseidón y Hades, derrocaron a su padre Cronos, decidieron repartirse, echándolo a suertes, el aire, el mar y el mundo subterráneo, dejando a la tierra firme como patrimonio común de todos ellos. Zeus se quedó con el aire, Hades con el mundo subterráneo y Poseidón con el mar. Sin embargo, juntamente con el mar, Poseidón se convirtió en el dueño de los lagos y de los ríos, por lo que en cierto modo la tierra firme le pertenecía, ya que estaba sustentada por sus aguas y, por tanto, podía conmoverla a su antojo. Su deseo de convertirse en el señor supremo de varias de las regiones bañadas por el Mediterráneo le llevó a sostener gran cantidad de peleas con otros dioses y con algunos mortales:

en el curso de las mismas, hacia estremecer las montañas, creando nuevas tierras e islas, todo ello acompañado muy a menudo por inundaciones y olas mareales. La existencia de un dios de los terremotos, al que se le atribuye el poder de provocar inundaciones y olas mareales, es conocida en otras muchas mitologías primitivas. En Japón, por ejemplo, el dios de los terremotos es Nai-no-Kami; en el centro de Colombia se le conocía como el demonio Chibchacum, el cual, después de haber sido derrotado por el gran dios del Sol, Bochica, había sido castigado a llevar la Tierra sobre sus espaldas. Los terremotos de los Andes y de Sudamérica se producen cuando Chibchacum se cansa y se pasa la carga sobre el otro hombro.

Hoy en día la mayoría de nosotros, tanto por la experiencia personal como por la programación de nuestra mente, creemos en la inamovilidad y estabilidad pétrea de la Tierra que nos sostiene. Es impensable que el suelo empiece a temblar y a romperse bajo nuestros pies. Las grandes sacudidas sísmicas suelen provocar un terror espantoso y un pánico irrefrenable tanto en las gentes poco cultivadas científicamente y que habitan en regiones en las que los terremotos son desconocidos, como incluso, momentáneamente, en algunos observadores científicos experimentados; las mismas representan la destrucción de nuestra propia concepción subconsciente del mundo. A esa reacción de terror subconsciente le sigue inmediatamente la sensación real de que un peligro inminente acecha; los edificios cercanos se derrumban, en los terraplenes y las vertientes de las colinas y montañas se producen corrimientos de tierras, enormes cascotes y fragmentos de rocas vuelan por todas partes impactando violentamente contra el suelo, el propio aire que respiramos se carga de finísimas partículas de polvo y un ruido ensordecedor nos acompaña mientras dura el fenómeno.

Los terremotos parecen tener la facilidad de matar con la mayor sencillez; ante esa impresionante demostración de las fuerzas de la naturaleza, el hombre se siente débil e indefenso. Se sabe que en los tiempos históricos millones de personas han muerto a causa de los terremotos; prácticamente no hay ni un año en que no se produzcan algunos grandes terremotos, de los que la prensa y los restantes medios de comunicación se hacen rápida y fielmente eco de las imágenes del desastre y de la descripción de los daños y de las calamidades; las llamadas internacionales en demanda de ayuda son algo ya bastante habitual en nuestros días. Muy a menudo, y especialmente en las regiones densamente pobladas, no es el terremoto en sí el causante del mayor número de víctimas, sino sus efectos secundarios: hundimiento de edificios, incendios, corrimientos de tierras y olas gigantes (los *tsunami* de los japoneses). Las enfermedades y las epidemias que siguen a algunos terremotos pueden hacer aumentar considerablemente el número final de víctimas.

Tabla 4-2. Principales terremotos registrados entre los meses de junio de 1976 y mayo de 1977

Fecha	Magnitud (Richter)	Lugar	Daños causados
1976			
3 junio	6,8	Mar de Solomón, Pacífico Sur	
7 junio	6,5	Filipinas	
7 junio	6,6	Aguas afuera de México, océano Pacífico	
20 junio	7,2	Indonesia	
25 junio	7,1	Oeste de Irian, Indonesia	37 pueblos fueron dañados, grandes deslizamientos sepultaron a un número indeterminado de personas, se recuperaron 433 cadáveres
26 junio	6,6	Islas Talaud, Indonesia.	
11 julio (16.45)	7,0	Frontera entre Panamá y Colombia	
11 julio (20.41)	7,1	Frontera entre Panamá y Colombia	
17 julio	6,6	Nueva Bretaña, Papúa-Nueva Guinea	
27 julio	8,2	Tientsin, China	El mayor terremoto desde el gran terremoto de Alaska del 27 de marzo de 1964 (magnitud 8,6). Daños materiales muy cuantiosos y cerca de 650.000 víctimas. 15 horas después de la sacudida principal se produjo una sacudida tardía excepcionalmente fuerte (consignada más abajo) que incrementó considerablemente las pérdidas de vidas humanas y materiales en esa densamente poblada región industrial y minera de China

Tabla 4-2. *(continuación)*

Fecha	Magnitud (Richter)	Lugar	Daños causados
28 julio	7,9	Tientsin, China	
2 agosto	6,9	Nuevas Hébridas, Pacífico sud-occidental	
16 agosto	6,9	Kansu-Szechwan, China	
16 agosto	8,0	Mar de las Célebes, al sur de Mindanao, Filipinas	Este terremoto submarino originó un tsunami de más de 15 metros de alto. Más de 8.000 personas murieron cuando el tsunami barrió las costas del sur de Mindanao y de las islas cercanas
17 agosto	6,7	Costa sur de Mindanao, Filipinas.	
21 agosto	6,6	Kansu-Szechwan, China.	
15 sept. (3.15)	6,2	Udine, nordeste de Italia.	
15 sept. (9.21)	6,0	Udine, nordeste de Italia	Los dos terremotos de Udine, a los que deben sumárseles otros 40 pequeños temblores, afectaron a una región que apenas se había recuperado de un terremoto ocurrido en mayo de 1976 y que había causado 1.000 víctimas; a pesar de que los nuevos terremotos no causaron víctimas, los trabajos de reconstrucción recibieron un rudo golpe
30 sept.	6,5	Islas Kermadec, Pacífico Sur	
29 oct.	7,1	Montañas Jayawijaya, oeste de Irian, Indonesia	Al menos murieron 133 personas. Había muchos refugiados de un terremoto previo (25 de junio de 1976)

Tabla 4-2. *(continuación)*

Fecha	Magnitud (Richter)	Lugar	Daños causados
7 nov.	6,3	Nordeste de Irán	Hubo 16 muertos y 32 heridos
7 nov.	6,8	Mindanao, Filipinas	
15 nov	6,5	190 kilómetros al este de Pekín, China	Se le considera una sacudida tardía del destructivo terremoto del 27 de julio de 1976. No causó víctimas
18 nov.	6,5	Islas Solomón	
24 nov.	7,4	Este de Turquía	Murieron entre 4.000 y 10.000 personas; otras 30.000 quedaron sin hogar
30 nov.	7,3	Norte de Chile	
20 dic.	6,5	Oeste de la Isla de Vancouver, Columbia Británica, Canadá	
1977			
6 enero	6,6	Mar de Bismarck, nordeste de Groenlandia	
31 enero	6,1	Tadzhik, URSS	Daños muy cuantiosos en la región de Isfara
4 marzo	7,2	Este de Rumania	1.541 muertos y 11.275 heridos; cuantiosas pérdidas materiales, especialmente en la capital, Bucarest
18 marzo	6,8	Luzón, Filipinas	
21 marzo	7.0	Sudeste de Irán	Más de 100 muertos
2 abril	7.5	Islas Tonga	
6 abril	6.0	Irán centro-meridional	En una área de cerca de 200 kilómetros cuadrados se produjeron cuantiosos daños materiales; 348 personas murieron y otras 200 fueron gravemente heridas

Tabla 4-2. *(continuación)*

Fecha	Magnitud (Richter)	Lugar	Daños causados
20 abril (23.13)	6,7	Guadalcanal	
20 abril (23.43)	7,4	Guadalcanal	
21 abril (4.24)	7,6	Guadalcanal	
12 mayo	5,8	Cercanías de Pekín, China	

Para cada uno de los terremotos principales aquí consignados se produjeron entre 20 y 50 temblores menores que pudieron ser percibidos por la gente y otros muchos temblores aún menores sólo detectables con métodos instrumentales. De la observación atenta de la lista se deduce que los grandes terremotos tectónicos tienden a concentrarse en determinadas regiones; también es frecuente la ocurrencia de terremotos en áreas previamente afectadas por otros terremotos

A los tsunamis se les llama a menudo "olas mareales" o "de marea", a pesar de que en realidad no tienen nada que ver con las mareas. Todos los tsunamis conocidos han sido provocados por terremotos submarinos, deslizamientos de fondos marinos, explosiones volcánicas o corrimientos de tierras que han alcanzado el mar. En la mitología griega se citan algunas inundaciones de consecuencias catastróficas causadas por este tipo de olas; es muy posible que las leyendas de la Atlántida y del Diluvio Universal hayan surgido a partir de la deformación popular de las dimensiones y efectos de antiguos tsunamis. El terremoto de Lisboa del año 1755 estuvo acompañado por un gran tsunami; desde 1596 Japón se ha visto azotado por 15 tsunamis destructivos (el del año 1896 provocó la muerte de 27.000 personas y destruyó 10.000 hogares); estadísticamente, las Islas Hawaii son barridas por grandes tsunamis una vez cada 25 años; los enormes tsunamis causados por la erupción del Krakatoa en 1833 fueron los responsables de un elevado número de pérdidas de vidas humanas en las cercanas Java y Sumatra (véase el capítulo 5).

Las dimensiones de estas grandes olas superan los patrones de medida habituales. Cuando están sometidas a la influencia de vientos especialmente violentos, las olas marinas normales pueden desplazarse a velocidades de hasta 100 kilómetros por hora, alcanzando asimismo longitudes de onda de algunos centenares de metros. En cambio, las longitudes de onda (la distancia horizontal entre dos crestas sucesivas) de los tsunamis pueden ser

de hasta 1.000 kilómetros, pudiendo desplazarse, en las regiones oceánicas profundas, a velocidades de hasta 800 kilómetros por hora. En comparación con su longitud de onda, son tan bajas que en el mar abierto pueden pasar desapercibidas. Sin embargo, su velocidad y su longitud de onda se reducen rápidamente a medida que van aproximándose a la costa; simultáneamente, su amplitud puede incrementarse bruscamente desde unos pocos metros hasta centenares de metros. La amplitud de la mayoría de ellas suele estar comprendida entre 6 y 20 metros, pero algunas revisten un carácter excepcional (como los tsunamis del año 1755 en Lisboa, del año 1883 en Krakatoa, y del año 1886 en Japón) y alcanzan alturas de más de 30 metros cuando se abalanzan sobre la costa. Los tsunamis son mucho más peligrosos en las costas ligeramente inclinadas mar adentro que en las costas abruptas en las que los fondos adyacentes tienen un perfil escalonado; los tsunamis pueden alcanzar proporciones gigantescas cuando quedan constreñidos dentro de estrechos brazos de mar, ensenadas, estuarios o bocanas de puertos (lámina 11).

Generalmente, la primera ola no es más que una gran oscilación escasamente alarmante. Le sigue un impresionante retroceso de las aguas respecto a la línea de costa; el mismo corresponde a la llegada del primer gran surco de la ola tsunami. Acto seguido llega la primera de las grandes olas, que arrolla todo lo que se le pone por delante. El intervalo generalmente largo entre olas sucesivas —entre 15 minutos y una hora— a menudo hace creer a la gente con falso alivio que el tsunami ya ha pasado; esa desacertada creencia ha provocado la muerte de muchas personas que habían vuelto demasiado pronto a sus devastados hogares, antes de que llegase la última de las olas mortíferas.

Los grandes terremotos, cuyas consecuencias serían desastrosas e incluso catastróficas si se produjesen en las regiones más densamente pobladas de la Tierra, se producen con relativa frecuencia; probablemente hay uno cada dos o tres semanas, pero la mayoría de estos grandes seísmos se desencadenan en los océanos (especialmente en los taludes continentales y en las dorsales medio-oceánicas) o en remotas regiones montañosas, por lo que causan muy pocos daños en relación directa con la vida humana y pasan prácticamente desapercibidos para los medios de comunicación de masas. Sin embargo, los terremotos son el principal riesgo geológico a que está sometida la raza humana; un rápido repaso de los principales seísmos ocurridos a lo largo de un año cualquiera basta para demostrar el enorme peligro potencial inherente a este tipo de fenómeno natural.

Un terremoto no es más que el paso de un tren de vibraciones a través de la corteza sólida; su propagación en el interior de la Tierra y a través de su superficie puede ser comparada con la propagación de las ondas gene-

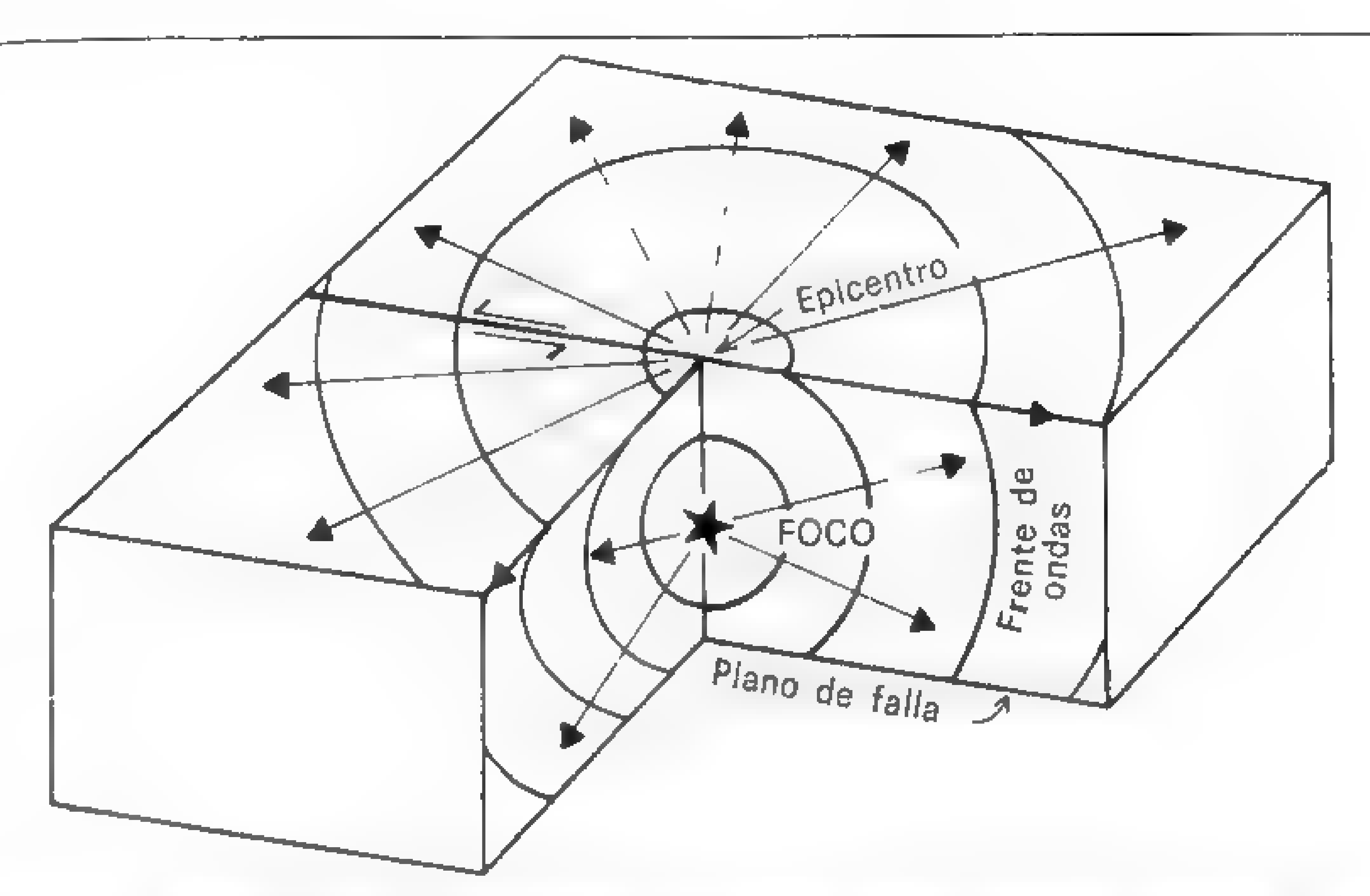


Fig. 18. Anatomía de los terremotos: los movimientos corticales someten a las rocas a esfuerzos muy elevados. Cuando esos esfuerzos alcanzan un determinado valor, los diferentes bloques estallan a lo largo de los planos de falla, liberando así la energía acumulada en forma de terremoto. Estas vibraciones sísmicas se irradian a partir del punto de fractura o foco. El punto de la superficie situado en la vertical del foco recibe el nombre del epicentro. A partir del mismo se irradian otro tipo de ondas paralelas a la superficie. Estas ondas son las responsables de los daños causados por los terremotos.

radas al tirar una piedra dentro de un estanque cuyas aguas estén quietas. En cuanto a su intensidad, los terremotos pueden no ser más que diminutos temblores que únicamente los instrumentos más sensibles pueden registrar o bien pueden revestir un aspecto espectacular y devastador, manifestándose como ondas gigantes en la superficie de la Tierra, con longitudes de onda comprendidas entre 6 y 9 metros y amplitudes de varias decenas de centímetros. En los cuerpos sólidos, las vibraciones se manifiestan como golpes bruscos, grietas o fricciones entre dos superficies toscas. Las vibraciones de los instrumentos musicales, tanto si están producidas por el impacto de martillos sobre cuerdas o membranas (como en los pianos y tambores) como por un rasgado de dos superficies ásperas (como en los violines), son transferidas al aire que les rodea y devienen audibles, excepto en los casos en que tales vibraciones son de frecuencias excesivamente elevadas para poder ser percibidas por el oído humano. Con los terremotos ocurre exactamente lo mismo; pueden ir acompañados por ruidos audibles

e inaudibles Son precisamente esos ruidos causados por vibraciones atmosféricas situadas fuera del límite de audibilidad humano los que a menudo son percibidos por perros, peces y otros animales inmediatamente antes de los grandes terremotos.

Los terremotos se producen en aquellos lugares en que las rocas de la corteza y del manto ceden ante los esfuerzos a que están sometidas; en los lugares en que los bloques se desplazan unos contra otros a lo largo de un plano de fractura (falla); en los lugares en que hay rocas volcánicas ascendiendo hacia la superficie; en los lugares en que se producen escapes de gases volcánicos; y, de hecho, en cualquier lugar en que se desate algún tipo de explosión, ya sea de origen volcánico o una bomba atómica o algún otro tipo de explosivo. Obviamente, la intensidad de las vibraciones sísmicas disminuye a medida que éstas se alejan de la fuente.

La mayoría de terremotos naturales, incluidos los más catastróficos, son terremotos *tectónicos* resultantes de la rotura de rocas sometidas a esfuerzos; es posible que en la mayoría de los casos este tipo de terremotos estén acompañados por desplazamientos a lo largo de los planos de falla. Hay dos clases principales de terremotos tectónicos: normales o someros, que se originan en la delgada corteza terrestre; y de foco profundo, que se originan a profundidades de hasta 800 kilómetros dentro del manto. Las rocas del manto tienen una densidad sensiblemente mayor que las de la corteza y, debido a esto, la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas es bastante mayor en el manto que en la corteza.

Por otra parte, las explosiones volcánicas y los movimientos subvolcánicos violentos dan lugar a otro tipo de terremotos muy frecuentes, pero de intensidades generalmente débiles; normalmente, estos terremotos se originan a una profundidad de menos de 80 kilómetros de la superficie. Los movimientos de rocas fundidas a través de la corteza superior, inmediatamente antes y durante algunas erupciones volcánicas, dan lugar a unas rápidas vibraciones de la Tierra denominadas *temblores armónicos*. Estos temblores, así como otros muchos tipos de vibraciones débiles (como las causadas por el paso de trenes y camiones, avalanchas, hundimientos de cuevas y minas, etc.), no son considerados "terremotos", a pesar de que pueden ser detectados y registrados por los sismógrafos.

La intensidad de los terremotos puede ser medida de forma subjetiva utilizando alguna de las escalas existentes, como la de *Rossi-Forel* o la de *Mercalli*. La intensidad de un terremoto no sólo disminuye a medida que aumenta la distancia respecto a la fuente; sus efectos en un lugar determinado dependerán también de la naturaleza de las rocas infrayacentes, mientras que su poder destructivo en cuanto a pérdidas de vidas humanas estará directamente relacionado con la densidad de población y con las

Tabla 4-3. Escalas subjetivas para medir la intensidad de los terremotos

(A)	*Escala de Rossi-Forel.*
I	*Temblor microsísmico.* Únicamente detectable en determinados tipos de sismógrafos; un observador experimentado es capaz de percibir el temblor
II	*Temblor extremadamente débil.* Detectable en todos los tipos de sismógrafos. Percibido por un número muy pequeño de personas en reposo.
III	*Temblor muy débil.* Percibido por algunas personas en reposo; es lo bastante intenso como para que su dirección o duración puedan ser apreciadas.
IV	*Temblor débil.* Percibido por personas en movimiento; las puertas y ventanas se mueven; algunos objetos se desplazan y caen; los techos se agrietan.
V	*Temblor de intensidad moderada.* Percibido por todo el mundo; los muebles se desplazan y caen, algunas campanas suenan.
VI	*Temblor moderadamente fuerte.* La gente que está durmiendo se despierta; todas las campanas suenan; las lámparas de techo oscilan; los relojes se paran; los árboles y los arbustos se agitan visiblemente; algunas personas asustadas abandonan sus hogares.
VII	*Temblor fuerte.* Caída generalizada de objetos; desconchados en las paredes; las campanas de las iglesias suenan; pánico general pero sin que los edificios resulten dañados de consideración.
VIII	*Temblor muy fuerte.* Las chimeneas se derrumban; los muros se agrietan.
IX	*Temblor extremadamente fuerte.* Destrucción total o parcial de algunos edificios.
X	*Temblor de intensidad extrema.* Grandes desastres; ruinas; grietas en el suelo, caída de rocas en las montañas, dislocaciones en los estratos.
(B)	*Escala de Mercalli* modificada (para adaptarla a las modernas condiciones y al actual estilo de vida en los países occidentales).
O	Sólo detectable mediante sismógrafos.
I	Únicamente percibido por personas que se hallen en una situación especialmente favorable (p. ej., acostadas sobre suelo duro).
II	Percibido por personas que están sentadas o acostadas, particularmente en edificios altos. Algunos objetos colgados pueden balancearse ligeramente.
III	Percibido en el interior de las casas (aunque no por todo el mundo), particularmente en los pisos más altos. Todos los objetos colgantes empiezan a balancearse. Vibraciones parecidas a las que produce el paso de un camión; no siempre se las atribuye a un terremoto.

Tabla 4-3. *(continuación)*

IV	Percibido claramente en el interior de las casas; los objetos colgantes se balancean violentamente; las vibraciones son parecidas a las que produce el paso de una caravana de camiones pesados, o bien puede tenerse la sensación de que una pesada bola de demolición está golpeando las paredes del edificio. Los automóviles estacionados se agitan, los cristales tintinean, los objetos de loza traquetean, las puertas dan golpes y los muros emiten crujientes sonidos.
V	Percibido por la mayoría de la gente, tanto en el interior como en el exterior de las casas. Las personas con el sueño ligero se despiertan. Los líquidos se agitan dentro de los recipientes y algunos se derraman. Pequeños objetos en equilibrio inestable caen o son desplazados. Las puertas se abren y se cierran de golpe. Los relojes de péndulo sufren paros ocasionales o cambian el ritmo de sus oscilaciones. Los objetos altos (como los postes y los árboles) pueden balancearse y quedar inclinados o torcidos. Algunas ventanas y objetos de loza pueden romperse. Generalmente, todo el mundo se da cuenta de que las vibraciones, las sacudidas y el ruido se deben a un terremoto.
VI	Percibido por todo el mundo cualquiera que sea su situación. Mucha gente se asusta y abandona sus hogares. Da la sensación de que las personas caminan inseguras. Se rompen muchos cristales, platos y demás objetos de vidrio. Los muebles se desplazan, y los más ligeros vuelcan. Los cuadros se caen de las paredes y los libros de las estanterías. Las campanas pequeñas de las iglesias suenan y los árboles se agitan visiblemente. Se producen desconchones en las paredes y algunas baldosas se desprenden.
VII	Percibido por todo el mundo, incluso por los conductores que viajan a gran velocidad; todos se dan cuenta de que se trata de un importante terremoto. A mucha gente le cuesta mantenerse en pie; tan pronto como pueden, huyen del interior de los edificios. Los objetos colgantes se balancean violentamente. Los muebles se rompen. Se produce la caída generalizada de cristales, enyesados, enladrillados, baldosas y cornisas; los muros se agrietan y crujen. Los edificios resistentes sufren pocos desperfectos; en cambio, en las casas muy viejas o mal construidas los daños pueden ser de consideración. En los bancos de arena y grava se producen pequeños deslizamientos y socavones; los canales de riego de hormigón también pueden resultar dañados. Las grandes campanas de las iglesias suenan.
VIII	Surge el pánico. Los vehículos en movimiento son desviados. Todas las estructuras humanas resultan dañadas, aunque en las sismorresistentes los daños pueden ser muy pequeños o incluso despreciables. En los edificios no tan bien construidos se derrumban las chimeneas, los muros y todas las obras de albañilería en general; se caen las columnas, las torres y los monumentos. Todos los cristales de las ventanas se rompen y caen a la calle. Las casas se salen de sus cimientos y los tabiques de separación interiores pueden ser proyectados al exterior. Se vuelcan los muebles más pesados. Se rompen ramas de los árboles. En los terrenos húmedos y en las pendientes abruptas se abren grietas por las que pueden salir pequeñas cantidades de barro y arena. El caudal o la temperatura de las fuentes y los pozos cambia.
IX	Pánico generalizado. Destrucción total de las estructuras de mampostería, excepto las de hormigón reforzado. Destrozos generalizados en los cimientos de todos los edificios. Graves daños en las presas y embalses. Revientan las tuberías subterráneas. El suelo se agrieta.
X	Todos los edificios y estructuras de todas clases son destruidos juntamente con sus cimientos. Únicamente resisten algunos edificios de madera muy bien construidos. Se abren brechas en los diques y las presas. Grandes corrimientos de tierras. Se doblan los raíles del ferrocarril. El agua se sale de los canales, ríos y lagos y se esparce sobre sus orillas. Masas de arena y fango se desplazan horizontalmente en las playas y en las zonas llanas. Los raíles del tren se doblan ligeramente.
XI	Los raíles del ferrocarril se curvan intensamente, adoptando formas sinuosas. Todas las tuberías y conductos subterráneos quedan destrozados. Prácticamente no queda ningún edificio en pie. Grandes deslizamientos e inundaciones se abaten sobre los valles.
XII	Catástrofe absoluta: todo ha sido destrozado. Las ciudades y los pueblos han sido convertidos en montones de escombros. Grandes bloques de roca han sido desplazados. El nivel del suelo y los contornos del paisaje quedan modificados. Formación de grandes ondas en el suelo. Algunos objetos son lanzados al aire. Pánico y desesperación indescriptibles en la población.
(C)	*Escala de Mercalli* adaptada a las condiciones ambientales y sociales del Japón.
O	Sólo lo detectan los sismógrafos.
I	Negligible; sólo lo perciben personas muy sensibles que estén quietas.
II	Débil; percibido por la mayoría de personas; produce ligeras vibraciones en las ventanas y en las puertas con celosías de estilo japonés (Shoji).
III	Bastante fuerte; las casas y los edificios se agitan, las ventanas y las puertas de estilo japonés traquetean, los objetos colgantes se balancean, los relojes de péndulo pueden pararse y los líquidos se bambolean en el interior de sus recipientes. Algunas personas se asustan y salen a la calle.
IV	Fuerte; intensas sacudidas de las casas y demás edificios, los objetos inestables se caen, los líquidos se derraman.

Tabla 4-3. *(continuación)*

V	Muy fuerte; aparecen grietas en los enyesados y en las paredes de ladrillos, se caen las lápidas de los cementerios y las farolas de piedra, etc Las chimeneas y los almacenes de adobe resultan seriamente dañados Se producen deslizamientos en las zonas montañosas abruptas.
VI	Desastroso: provoca el hundimiento de más del 1% de las casas de madera japonesas; deslizamientos; en las zonas llanas surgen grietas acompañadas ocasionalmente por borboteos de fango, arena y agua.
VII	Catastrófico; provoca el derrumbamiento de casi todos los edificios; en el suelo se forman grandes fisuras y fallas.

características de los edificios existentes en el lugar afectado por el terremoto. La más utilizada de las escalas de intensidad es la escala de Mercalli modificada; esta escala mide la intensidad de los terremotos atribuyéndoles diferentes grados, desde el I (terremotos que sólo son detectados en los sismógrafos) al XII (terremotos catastróficos que causan una destrucción total). A pesar de que estas escalas de intensidad puedan parecer excesivamente detalladas, o incluso involuntariamente graciosas, lo cierto es que posibilitan el registro gráfico de los efectos reales de un terremoto tal y como los han visto las gentes que viven en la región afectada por el mismo.

Inicialmente, el estudio de los terremotos consistía en acumular datos y observaciones de testigos visuales acerca de los daños causados, los desplazamientos sufridos por los objetos, la orientación de las grietas y fisuras, y la ocurrencia de temblores, "seiches" y tsunamis. Los mapas isosísmicos (en los que se delimitaban las zonas de igual intensidad sísmica) se trazaban comparando las intensidades aparentes observadas en lugares distintos. A partir de la distribución de las líneas isosísmicas en esos mapas, normalmente se puede definir la pequeña área central o *epicentro* en que el terremoto adquirió la máxima intensidad. Para confirmar o completar esas conclusiones, los especialistas estudiaban cuidadosamente las trayectorias recorridas por los objetos caídos o desplazados, así como las orientaciones de las grietas de los edificios y del suelo. Se asumía que el foco del terremoto estaba situado justamente debajo del epicentro pero a una profundidad desconocida. Tal y como ya hemos dicho, los terremotos tectónicos están causados por la ruptura explosiva de rocas sometidas a esfuerzo o por las fricciones que se producen a lo largo de los planos de falla activos formados, precisamente, a consecuencia de la ruptura de las rocas; por tal motivo, algunas áreas epicentrales tienen una forma oval o elongada, con el eje alineado en la vertical de la falla en que está situado el *foco* o la línea de

focos del terremoto. En estas áreas epicentrales elongadas puede que los principales daños no se produzcan justamente encima del foco, sino que estén relacionados con movimientos posteriores en otros segmentos de la falla originados en respuesta a la ruptura inicial.

En los tiempos de los emperadores Han (202 a.C. hasta el 220 de la era cristiana) ya se utilizaba en China un instrumento que detectaba los terremotos. Era un objeto en forma de campana de ocho dragones que tenían una bola en sus fauces; cada dragón estaba orientado en una dirección distinta. Cuando se producía un terremoto de cierta importancia, una de las bolas caía de las fauces del dragón orientado en la dirección de la que procedía la onda sísmica. En los últimos siglos se desarrollaron en Europa varios instrumentos parecidos que iban desde unos recipientes multiacanalados rellenos de mercurio hasta sofisticados objetos de madera parecidos a árboles de Navidad de los que pendían delicados cursores compensados. A los instrumentos de este tipo se les llamaba *sismoscopios:* pueden utilizarse para detectar la ocurrencia de terremotos y para obtener una estimación aproximada acerca de la dirección e intensidad relativa del origen del trastorno. En 1853, Luigi Palmieri, director del Observatorio Vulcanológico del Vesubio, construyó un instrumento que, además, registraba exactamente la hora de llegada de una onda y medía su duración. En 1880, John Milne, un inglés que trabajaba en Japón, mejoró este instrumento y fabricó el primer aparato moderno capaz de medir y cronometrar todas las vibraciones del suelo asociadas con un terremoto. Actualmente, hay una amplia red de tales aparatos, denominados sismógrafos o sismómetros, distribuidos por todo el mundo. Gracias a la información que proporciona esta red de sismógrafos, los científicos pueden localizar con gran exactitud el epicentro y la profundidad focal de cualquier terremoto natural, tanto si es pequeño como si es grande. Los sismógrafos también pueden detectar las explosiones artificiales y otros muchos eventos. En las dos últimas décadas se han construido algunas líneas de sismógrafos altamente sofisticadas, capaces de detectar y localizar vibraciones muy débiles de la Tierra procedentes de fuentes alejadas, incluidas las generadas por los ensayos nucleares subterráneos que tienen lugar en el otro extremo del globo.

Hoy en día, la escala de Mercalli y las que se le parecen han caído en desuso. Normalmente, la magnitud de un terremoto se mide ahora mediante la "escala de Richter". Esta escala relaciona la amplitud de un terremoto, medida en los sismógrafos, con la energía total gastada en el mismo. Es una escala abierta que progresa logarítmicamente. A grandes rasgos, un incremento de una unidad en la escala de Richter significa que el terremoto es de 30 a 35 veces mayor que el número anterior. Según esta escala, un terremoto de magnitud 4,5-5 sólo causará daños muy localizados, mientras

que un terremoto de magnitud 7 ó más ya es un terremoto muy importante. Posiblemente, el mayor terremoto conocido (el de Lisboa del 1 de noviembre de 1755) tenía una magnitud de unos 8,9 grados en la escala de Richter: sólo los terremotos realmente muy importantes superan los 8,4 grados.

La corteza terrestre está prácticamente siempre y en todas partes sometida a algún tipo de tensión. Las mayores concentraciones de tensiones se producen, tal y como ya dijimos en el capítulo 3, a lo largo de los límites entre las placas corticales; pero incluso en el interior de las placas pueden producirse acumulaciones de tensiones que superen la competencia elástica de las rocas. La rotura de las rocas debajo de los volcanes se produce debido a los movimientos ascendentes del magma y a la liberación explosiva de gases volcánicos. Siendo esto así, en todo momento existen en el mundo diversos sectores, grandes o pequeños, en que los esfuerzos elásticos acumulados en la corteza terrestre hacen que las rocas que allí se encuentran estén muy próximas a su punto de rotura. En estas circunstancias, basta un pequeño esfuerzo adicional para desencadenar un terremoto. Se comprende, por tanto, que los cambios causados por la tensión consecuente de un gran terremoto pueden provocar una reacción en cadena que se traducirá en una serie de sacudidas grandes o pequeñas. También se comprende que las pequeñas alteraciones del campo de esfuerzos en la corteza generadas por el paso de depresiones ciclónicas profundas o por las mareas (y especialmente por las mareas terrestres) pueden desencadenar auténticas secuencias de terremotos. Las mareas terrestres o de la parte sólida de la Tierra son pequeñas variaciones secuenciales del diámetro y la forma del globo causadas por la atracción gravitatoria combinada del Sol, la Luna y otros planetas sobre el cuerpo de la Tierra. Las variaciones a largo plazo en la amplitud y periodicidad de esas mareas terrestres se deben a movimientos relativos de los planetas. Cuando este tipo de mareas se ve reforzado por una disposición particularmente favorable de los planetas y del Sol, pueden producirse notables incrementos de la actividad sísmica: la influencia de Júpiter, el planeta gigante, puede ser especialmente significativa en este sentido: es el denominado "efecto de Júpiter".

Las vibraciones sísmicas viajan a través de la Tierra sólida de dos maneras distintas: hay unas ondas compresionales en las que las vibraciones se desplazan en la misma dirección de propagación de las ondas (ondas P), y unas ondas transversales u oscilaciones de componente transversal o lateral (ondas S). Las ondas P se desplazan más rápidamente que las ondas S y, por tanto, llegan a un punto determinado mucho antes que las ondas S. Ambos tipos de ondas se reflejan y se refractan en las superficies de contraste de densidades existentes en la estructura estratiforme de la Tierra. Este hecho ha permitido la utilización de vibraciones tanto artificiales como

naturales para investigar la estructura interna de la Tierra. Las vibraciones artificiales son muy utilizadas para investigar la estructura geológica de los campos petrolíferos, de las cuencas carboníferas y son de gran ayuda para hallar nuevos yacimientos minerales. El estudio de la propagación de las ondas sísmicas ha permitido delimitar las principales envueltas concéntricas que constituyen la Tierra. El hecho de que las ondas S no se propaguen a través del núcleo de la Tierra confirma la creencia de que él mismo se halla en estado fluido a pesar de las presiones a que está sometido.

La cooperación internacional durante muchos años ha permitido obtener un gran número de datos de alcance mundial recopilados gracias a la red mundial de sismógrafos y enormemente valiosos para los especialistas en la materia. Gracias a esa cooperación, se han podido conocer mejor muchos aspectos relacionados con los terremotos, así como precisar su distribución; todo ello ha permitido llegar a interesantes conclusiones acerca de la composición, el funcionamiento dinámico y la historia de la corteza superior de la Tierra. Los terremotos ni surgen ni se distribuyen al azar. Existe un pequeño número de "zonas sísmicas" claramente definidas, dentro de las cuales se producen la inmensa mayoría de grandes y pequeños terremotos naturales. Tal y como ya dijimos en el capítulo 3, existe una relación directa entre las cadenas montañosas, los cinturones sísmicos y la ubicación de la mayor parte de volcanes activos de la Tierra. No es casualidad el hecho de que el cinturón sísmico circumpacífico coincida a grandes rasgos con el "anillo de fuego" volcánico circumpacífico y con el cinturón de jóvenes sistemas montañosos que circunda el océano Pacífico. Otros grandes cinturones sísmicos son el alpino-himalayo, que va desde el Mediterráneo hasta el Asia Central y se une al cinturón circumpacífico en las Indias Orientales; la zona del Pamir-Baikal, en el Asia Central; una región triangular muy activa en el este de Asia, rodeada por la zona del Pamir-Baikal y por los cinturones alpino-himalayo y circumpacífico; la zona del Valle del Gran Rift en África; las Islas Hawaii y las principales dorsales oceánicas, incluidas la medio-atlántica y la medio-índica. Los principales cinturones sísmicos también coinciden con los límites o bordes de placa (véanse las figs. 12 y 19). En los centros de expansión de los fondos oceánicos, en Hawaii, debajo de las áreas volcánicas activas y en algunas otras regiones como el Rift de Kenia, muchos terremotos someros están directamente relacionados con el vulcanismo; el origen de los mismos puede radicar tanto en los movimientos ascendentes del magma como en erupciones explosivas (en este capítulo ya no nos referiremos más a este tipo de terremotos). En todas partes se producen terremotos tectónicos someros originados por la fracturación de las rocas y los movimientos a lo largo de planos de falla; pero estos terremotos son mucho más frecuentes a lo largo de los bordes

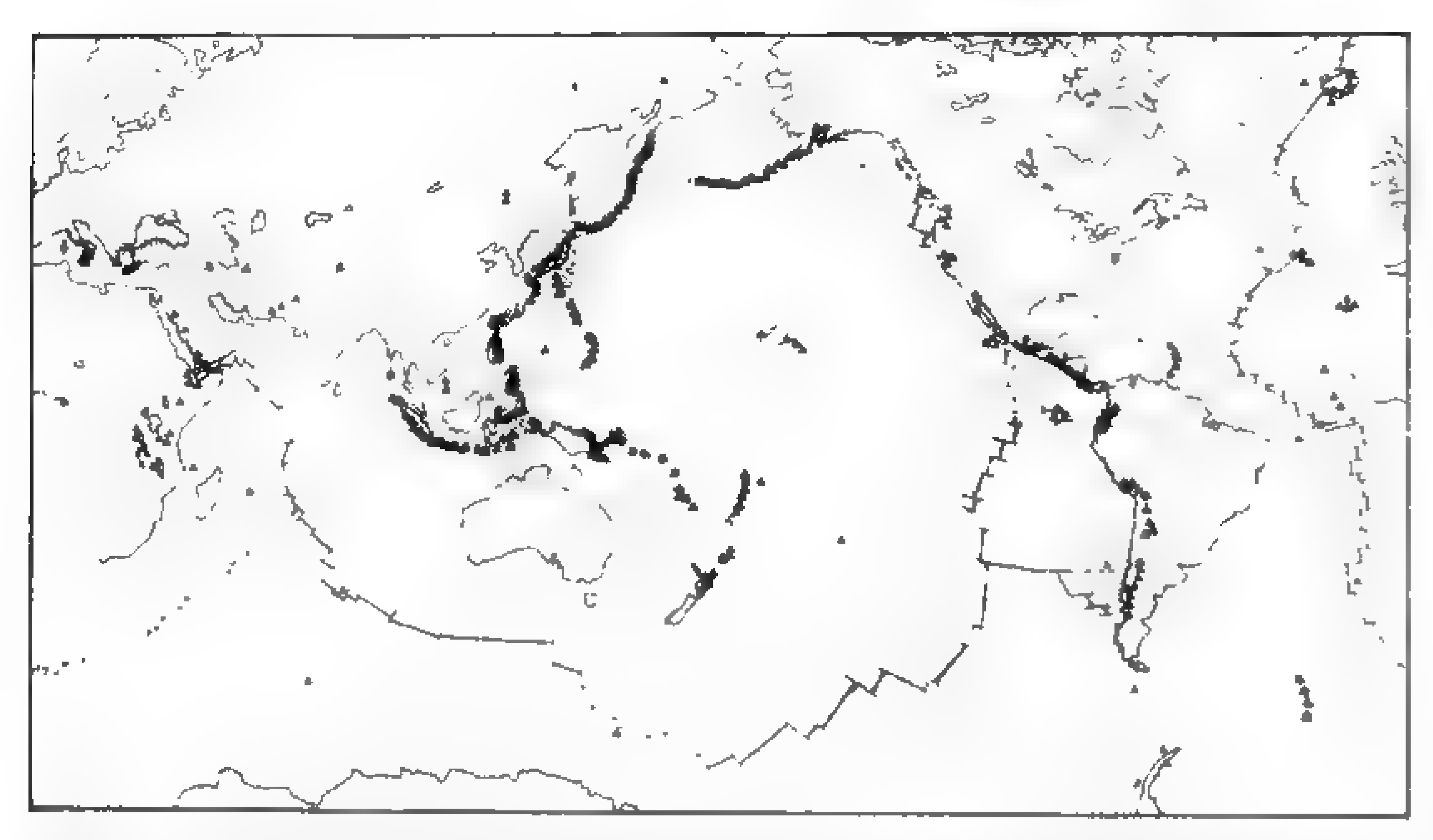


Fig. 19. Volcanes y zonas sísmicas del mundo: ambos están estrechamente relacionados con los bordes de las mayores placas corticales del mundo (véase la fig. 11). Es precisamente en esos lugares dónde los procesos de expansión y las colisiones entre placas originan terremotos destructivos y erupciones volcánicas catastróficas. La cadena de volcanes del "anillo de fuego del Pacífico" coincide con bordes de placa destructivos (zonas de Benioff).

activos de placas, en las zonas de Rift, a lo largo de las fallas transformantes, y en antiguos bloques montañosos sometidos a procesos de rejuvenecimiento y/o reajuste tectónico. Los terremotos tectónicos de foco profundo únicamente se producen en las zonas de subducción de placas. Hace mucho tiempo se descubrió que debajo de ciertos archipiélagos y cadenas montañosas existían unas zonas planares inclinadas en las que se ubicaban los focos de los terremotos profundos, a profundidades comprendidas entre 80 y 800 kilómetros. Esas zonas fueron denominadas *zonas de Benioff*. Con el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas, se vio claramente que las zonas de Benioff eran la traza tectónica dejada por la subducción de una placa cortical cuando se hunde debajo del manto superior. Dos buenos ejemplos de zonas de Benioff simples se hallan debajo del arco del Japón y de las Islas Aleutianas. Debajo de todos los sistemas montañosos jóvenes hay zonas de Benioff más complejas.

Ningún lugar del mundo está libre de terremotos por completo. Los actuales habitantes de la antigua ciudad catedralicia de Canterbury, en Kent, Inglaterra, están seguramente convencidos de que viven en un lugar

en el que nunca ha habido terremotos. Si bien es verdad que Kent no ha sufrido terremotos durante muchos años, lo que desde luego no es cierto es que nunca haya habido terremotos en la región. El 1 de junio del año 1246 hubo un terremoto, como pocas veces se ha visto u oído, que afectó a toda Inglaterra. En Kent revistió mayor violencia que en ninguna otra parte, y causó el hundimiento de varias iglesias. El 21 de mayo de 1382 otro terremoto de considerables proporciones sacudió la región de Canterbury, "atemorizando a muchos, y provocando el hundimiento de varias iglesias"; el 6 de abril de 1580 otro gran terremoto, que también fue percibido en Francia y Bélgica, sacudió Inglaterra. En la zona oriental de Kent se produjeron tres sacudidas distintas, a las 6, a las 9 y a las 11 horas. En Dover, grandes fragmentos de los "acantilados blancos" cayeron al mar, arrastrando consigo un lienzo del muro del castillo. También hubo hundimientos parciales en el castillo de Saltwood y en la iglesia de Sutton, ambos en Kent. El mismo año, inmediatamente después de la medianoche del día 1 de mayo, "un nuevo terremoto se dejó sentir en diversas partes de Kent, particularmente en Ashford, Great Chart, etc., la gente se levantó de sus camas y corrió hacia las iglesias para rogarle a Dios que tuviera piedad de ellos". El 1 de junio de 1756 se produjo en Ashford un temblor acompañado de un ruido parecido a un cañonazo; el 27 de noviembre de 1776 se percibió en todo el este de Kent un temblor que duró ocho segundos y que estuvo acompañado por un lejano retumbo; el 2 de marzo de 1831 se sintió en toda la costa, desde Dover hasta Margate, una fuerte sacudida; el 19 de octubre de 1848 se produjeron en Sandwich, Kent, unos temblores asociados a unos ruidos subterráneos que se prolongaron por espacio de cuatro a cinco segundos. Sin ninguna duda, más tarde o más temprano se producirán nuevos terremotos en Kent; y cuando eso ocurra, la gente, tan tranquila y confiada, experimentará el mismo pánico que sus predecesores experimentaron en 1382 y 1580.

Los habitantes del resto de las Islas Británicas tampoco están a salvo de los terremotos. Londres ha sido afectado muchas veces; durante el terremoto del 6 de abril de 1580 se derrumbaron las chimeneas y cayeron cascotes de las iglesias de San Pablo, Temple y Cristo; un aprendiz murió alcanzado por las piedras que cayeron de la iglesia de Cristo. En 1750, entre los meses de febrero y junio, se produjeron seis terremotos en Londres; en el peor de ellos, el 19 de marzo, muchas chimeneas y algunas casas se derrumbaron bajo los efectos de un "súbito y violento movimiento acompañado por el retumbar de un ruido parecido al de un trueno lejano". Caían cascotes del nuevo capitel de la Abadía de Westminster, los perros aullaban, los corderos y otros animales se movían presos de agitación, los peces saltaban fuera de los estanques en los que el agua experimentaba

bruscos vaivenes. El mayor terremoto conocido en Inglaterra en los últimos años se produjo cerca de Colchester, en Essex, a las 9.18 horas del día 22 de abril del año 1884. En Colchester más de 400 edificios resultaron dañados (entre ellos cuatro iglesias y seis capillas). En la cercana ciudad de Peldon no hubo ni una sola casa que quedase totalmente indemne. La mayoría de chimeneas se derrumbaron, y en un área de 250 kilómetros cuadrados más de 1.200 edificios tuvieron que ser reparados. Según los observadores presentes en Colchester, se produjeron dos sacudidas separadas por un intervalo de dos o tres segundos.

Es muy probable que todos los terremotos naturales que se han producido en Inglaterra durante los últimos 1.000 años hayan sido causados por movimientos a lo largo de fallas. No es, por tanto, sorprendente que muchos de estos terremotos estuviesen centrados en grandes dislocaciones de la corteza terrestre, como por ejemplo la Falla del Gran Glen, que cruza de parte a parte los Highlands escoceses noroccidentales; la Highland Boundary Fault, que va desde Stonehaven hasta Rothesay; y la Falla Dinorwica, en los estrechos de Menai, que separa la antigua isla de Anglesey del resto de Gales del Norte. En los lugares en que las antiguas rocas del basamento de Inglaterra están profundamente enterradas debajo de sedimentos más recientes, tal y como ocurre en el sudeste de Inglaterra, no es fácil identificar las fallas individuales responsables de los distintos terremotos. Sin embargo, se sabe que la mayoría de terremotos que han sacudido Kent se deben a pequeños reajustes en la compleja malla de fallas que cortan el carbonífero plegado y otras rocas más antiguas situadas debajo de la cobertura sedimentaria. La complejidad de las rocas del subsuelo de Kent es bien conocida gracias a los trabajos de exploración y explotación mineras de las vetas carboníferas que contiene. El cinturón de rocas plegadas y fracturadas que subyace debajo de Kent forma parte de un antiguo cinturón montañoso denudado; es todo lo que queda de una gran cadena montañosa que dominó el relieve del sur de Inglaterra y de las zonas próximas del continente europeo durante unos 100 millones de años, entre 300 y 200 millones de años antes de la actualidad. La distorsión progresiva de la placa continental europea genera esfuerzos en la frágil capa superficial. Cuando estos esfuerzos alcanzan un valor crítico, las rocas se fracturan, produciéndose movimientos y reajustes entre bloques. Esta relajación de esfuerzos puede provocar el rejuvenecimiento de antiguas fracturas o la creación de otras nuevas. En cualquier caso, el resultado es un terremoto o una serie de terremotos. Todos los terremotos modernos que se producen en Inglaterra son perfectamente atribuibles a esta causa.

Esto no significa en modo alguno que en Inglaterra no se perciban los terremotos generados en áreas alejadas. De hecho, el gran terremoto de Lisboa del 1 de noviembre del año 1775 fue sentido hasta en Escocia. Alrededor de las 9.30 de la mañana las aguas del Lago Lomond experimentaron repentinamente sin la menor brizna de aire una brusca subida en sus orillas de 70 centímetros sobre su nivel normal, para sufrir acto seguido un descenso del mismo orden. Esas oscilaciones del nivel se prolongaron, a intervalos de cinco minutos, durante tres cuartos de hora; seguidamente, su amplitud empezó a disminuir. A las 11 de la mañana las aguas del lago ya habían vuelto a recuperar su tranquilidad habitual. Este tipo de "seiches" fueron asimismo observadas en otros muchos estanques, lagos y canales repartidos por toda Inglaterra. Las olas sísmicas marinas no alcanzaron las costas británicas hasta la tarde. En la Bahía de Penzance, la altura de la ola mayor fue de 2,5 metros; la misma llegó alrededor de las 3 de la tarde.

La destrucción de Lisboa en el año 1755 (lámina 3) fue un desastre que tuvo una gran repercusión sobre el pensamiento europeo de finales del siglo XVIII. Voltaire mudó su anterior optimismo y complacencia ("en este mundo, que es el mejor de todos los mundos posibles, todo sucede para bien") y se convirtió en el influyente escéptico de sus últimos años. Escribió su famoso libro, *Cándido*, en tres días, mientras se estaba aún recuperando del trauma mental que le produjeron los hechos de Lisboa. En esta obra, Cándido es un héroe satírico que se ve involucrado en el terremoto de Lisboa; Cándido comienza sus aventuras cuando, juntamente con el filósofo Pangloss y un robusto marinero, fueron arrojados por las olas sobre la playa, cerca de Lisboa, como los únicos supervivientes de un naufragio. Cuando se dirigía hacia la ciudad, la Tierra empezó a temblar y el mar se encrespó súbitamente haciendo añicos a los barcos anclados en el puerto. Mientras los edificios se derrumbaban sobre sus cimientos, la ciudad empezó a arder. Treinta mil personas murieron sepultadas bajo las ruinas. Para el rudo marinero, el desastre significaba la posibilidad de hacerse con un suculento botín; para Cándido, aquello era "el día del Juicio Final", pero para Pangloss no se trataba más que de un interesante fenómeno científico para investigar. El filósofo consoló a Cándido y a otros supervivientes diciéndoles que "no hay mal que por bien no venga, ya que, al haber ocurrido en Lisboa, es imposible que ese terremoto ocurra en otro lugar. En un lugar nunca puede ocurrir una cosa igual a la que sucedió en otro sitio; por tanto, todo es para bien", Voltaire no consiguió que las autoridades portuguesas y los pensadores más prominentes aceptasen sus puntos de vista sobre el terremoto. Los describió como habiendo decidido que la mejor manera de evitar posteriores destrucciones de la ciudad consistía en promulgar un *auto de fe* que incluiría el sacrificio de algunas personas elegidas para ser quemadas a fuego lento en la hoguera. Cándido y Pangloss fueron dos de las personas detenidas con esta finalidad. Cándido es rítmicamente azotado y

Pangloss muere ahorcado. Otros son quemados vivos en la hoguera. Al día siguiente se produce otro terrible terremoto

Voltaire no fue el único pensador europeo que quedó profundamente impresionado por el terremoto de Lisboa. Goethe, que por aquel entonces tan sólo contaba seis años de edad, recordaría posteriormente que "el demonio del miedo" se expandió por todo el mundo. Todo el mundo quedó traumatizado, no sólo por las grandes proporciones de la catástrofe, sino también por el carácter aparentemente irracional y fortuito de ese "castigo de Dios"; pecadores y creyentes, jóvenes y viejos, pobres y ricos, todos perecieron en aquel terrible holocausto. Sin embargo, todos los sabios y pensadores europeos intentaron explicar el desastre según sus propios prejuicios. Para Rousseau el terremoto había sido una advertencia contra el hecho de que los hombres viviesen en multitudinarias ciudades; para mucha gente sencilla que vivía lejos de Lisboa el terremoto era también un aviso del buen Dios, que no estaba dispuesto a tolerar la creciente maldad que se estaba adueñando del mundo. Hubo incluso quienes, como Wesley, manipulando los hechos de forma que favoreciesen la difusión de su propio dogma, llegaron a afirmar que ese aviso del cielo no iba dirigido "a los hombres sencillos y buenos, sino a los engreídos, ricos y honorables hipócritas llamados cristianos". Sin embargo, fueron los sencillos y buenos lisboetas que vivían en la orilla del mar quienes más sufrieron sobre sus carnes los efectos del terremoto. En Inglaterra se hizo un serio intento, aunque de corta duración, para reformar la sociedad; ciertamente, los bailes de máscaras y las fiestas de disfraces, que hasta entonces habían sido el furor de Londres, fueron abolidos para siempre. Podría decirse que el desastre de Lisboa afectó tan profundamente las ideas y la moral de los hombres de la segunda mitad del siglo XVIII como años más tarde, en 1945, ya en pleno siglo XX, lo harían los lanzamientos de dos bombas atómicas sobre el Japón. Según las primeras informaciones que recibió Voltaire, en el espacio de 6 minutos, 15.000 hombres, mujeres y niños habían muerto aplastados bajo las campanas y las torres de las iglesias lisboetas, engalanadas para la fiesta sacra del Día de Todos los Santos. ¿Cómo podemos continuar creyendo, razonaron algunos, en un dios todopoderoso y benevolente que puede causar la muerte de miles de seres inocentes momentos antes de que se reuniesen para hacerle llegar sus rezos y plegarias? Se sabe ahora que sobre un total de 275.000 habitantes, entre 10.000 y 15.000 perdieron sus vidas aquel día. Treinta iglesias y la mayoría de los edificios de la ciudad quedaron destruidos. Los que se salvaron de la destrucción total por el terremoto o el tsunami se vieron seriamente dañados por los numerosos incendios que estallaron en toda la ciudad; algunos ardieron durante días enteros. Valiosas bibliotecas, monumentos y museos quedaron destruidos;

se perdieron interesantes pinturas de Tiziano, Correggio y Rubens. En los días siguientes murieron de 15.000 a 30.000 personas más a causa de las enfermedades, el hambre y otros efectos indirectos del terremoto; no obstante, las cifras en cuanto al número de víctimas del terremoto de 1755 no son del todo fiables

El famoso vulcanólogo francés Haroun Tazieff visitó el sur de Chile inmediatamente después de la serie de devastadores terremotos que asolaron la región en mayo del año 1960 con el fin de estudiar sus efectos, recopilar datos que le permitiesen trazar los mapas isosísmicos y observar una erupción volcánica que se había iniciado dos días después de la sacudida sísmica principal. Su informe constituye una de las mejores descripciones dirigidas al público en general por un observador científico especializado. Tazieff y tres compañeros llegaron a la semidestruida ciudad de Puerto Montt justo a tiempo para experimentar por sí mismos una de las numerosas sacudidas tardías de lo que se conoce como "gran terremoto de Chile del año 1960". En Puerto Montt y en Valdivia, la sacudida principal alcanzó una intensidad de XI grados en la escala de Mercalli; los daños fueron generales y muy intensos en los edificios, carreteras, vías férreas e instalaciones portuarias. Los muelles se rompieron y los bloques de hormigón que los constituían quedaron volcados; camiones cargados y almacenes llenos de mercancías fueron arrojados al mar; los barcos encallaron; el rompeolas de Puerto Montt se fragmentó en dos mitades separadas por una línea zigzagueante. Las casas de extensos sectores de ambas ciudades quedaron totalmente destruidas. Al describir sus impresiones los nativos le explicaron a Tazieff que durante la sacudida principal vieron cómo gruesas columnas de madera se doblaban como maromas, cómo grandes ondulaciones avanzaban a través de las calles pavimentadas al igual que si se tratase de olas en el mar, y grandes serpenteos escalaban las chimeneas de las fábricas. Sin embargo, estas observaciones, por otro lado bastante ajustadas a la realidad, no son más que simples ilusiones de los sentidos causadas por los efectos fisiológicos y psicológicos de los temblores de tierra violentos. Tazieff examinó detalladamente las columnas de madera, los pavimentos de las calles y carreteras y el enladrillado de las chimeneas y se convenció a sí mismo de que no presentaban ningún indicio que delatase las tremendas deformaciones que, según los nativos, habían sufrido. Obviamente, gran parte de las dramáticas descripciones de los testigos oculares de los antiguos terremotos (como, p. ej., el terremoto del año 1812 en Caracas, Venezuela) demuestran la misma sinceridad, pero hay una elevada carga de ilusiones ópticas. Es innegable que durante un terremoto se producen vibraciones y ondulaciones del suelo, pero éstas no suelen tener las proporciones que nuestros perturbados sentidos nos indican en tales ocasiones.

La crisis sísmica del año 1960 en el sur de Chile empezó antes del amanecer del día 21 de mayo. A las 6 de la mañana, las ciudades de Concepción y Chillán y toda la península de Arauco fueron sacudidas por un terremoto de intensidad VIII en la escala de Mercalli (7,75 en la escala de Richter). En Concepción, muchos edificios, torres de iglesias y antiguas casas de piedra y ladrillo se derrumbaron; centenares de personas murieron en sus propias camas. Media hora más tarde se produjo un segundo temblor tan violento como el primero; sin embargo, el número de víctimas causado por esta segunda onda fue mucho menor que el de la primera debido a que la gente ya se había alejado de los edificios. La mayor sacudida de todas se produjo a las tres de la tarde del día siguiente, domingo. Si en el momento en que ésta ocurrió la gente de la región hubiese estado en cama o dentro de sus casas, el número de víctimas mortales habría sido increíblemente alto: más del 16 por ciento de viviendas de la región quedaron totalmente destruidas; otras muchas sufrieron serios daños. Una gran cantidad de fábricas, centros comerciales, tiendas, oficinas y escuelas quedaron convertidos en montones de escombros, como si nunca hubiesen existido. Afortunadamente, hacía una tarde muy agradable y numerosas familias la habían aprovechado para salir al campo o a pasear por la ciudad. Además, dos temblores previos dieron la voz de alarma; el primero ocurrió 15 minutos antes de la sacudida principal y fue tan fuerte como los dos del día anterior; el segundo acaeció tan sólo un minuto antes de la sacudida principal y fue todavía más fuerte, alcanzando los 7,8 grados de intensidad en la escala de Richter. La sacudida paroxismal que siguió tuvo una intensidad de 8,7 grados en la escala de Richter; sin ningún género de dudas, es uno de los mayores terremotos de que se tienen noticias. Las ciudades más perjudicadas fueron Valdivia, Puerto Montt y Castro (en la gran isla de Chiloe); en todas ellas el seísmo alcanzó los XI grados de intensidad en la escala de Mercalli. Los VII grados de intensidad se superaron en una extensa región de 600 kilómetros de longitud por 200 kilómetros de ancho a lo largo de la costa chilena. Durante los ocho días siguientes aún se produjeron otros tres importantes seísmos en diferentes lugares de esa región; les siguieron una larga serie de pequeños temblores que se prolongaron por espacio de algunas semanas; sin embargo, uno de esos "pequeños" temblores alcanzó los 7,0 grados de intensidad en la escala de Richter.

Poco tiempo después de la sacudida principal del domingo por la tarde, la gente de la faja costera vio cómo el mar ascendía por encima del nivel de las grandes pleamares, descendiendo rápidamente a continuación hasta un nivel mucho más bajo que el de las mayores bajamares. Los habitantes de la región costera chilena ya están bastante familiarizados con este tipo de fenómenos, por lo que tan pronto como vieron que ocurría aquello la mayoría de ellos huyeron inmediatamente hacia las colinas cercanas: de no haber obrado de esta forma, el número de víctimas causado por el tsunami habría sido mucho más elevado. En Corral, un pequeño puerto a 16 kilómetros de Valdivia, las aguas del estuario estuvieron violentamente agitadas mientras duró el terremoto; en los bajos, los movimientos oscilatorios de las aguas arrastraban rítmicamente grandes cantidades de arena, lo que hacía que los bancos formados por la arena mostrasen alternativamente sus lomos (cual enormes ballenas) o desapareciesen bajo las aguas. Cuando cesaron las vibraciones, el nivel de las aguas empezó a subir lentamente pero acelerando rápidamente hasta que éstas se situaron entre 3 y 5 metros por encima de su nivel normal, con lo que la ciudad quedó inundada. Este alto nivel, al que llegaron aproximadamente a las cuatro de la tarde, se mantuvo durante unos cinco minutos. Tres barcos anclados, que serían arrastrados posteriormente por las aguas, rompieron amarras. A las 4.10 el nivel de las aguas empezó a disminuir a velocidad creciente y con un ruido atemorizador; en su descenso, las aguas dejaron varado sobre el muelle al buque *Santiago*, de 3.000 toneladas. Muchos de los habitantes de Corral bajaron a toda prisa de las colinas y lugares elevados en que se habían refugiado en un loco intento por salvar sus pertenencias mientras las aguas se retiraban, pero pagaron con sus vidas al ser atrapados por la segunda ola, un tsunami de 8 metros de alto que se abatió a 200 km por hora sobre la pequeña ciudad a las 4.20, destruyendo todos los edificios. Al pie de las colinas en las que se habían apiñado las mujeres y los niños flotaban los restos de 800 viviendas y los cuerpos de aquellos que habían intentado regresar a la ciudad sin dilación. Los botes y barcos de pesca fueron engullidos por las aguas embravecidas cuando se abalanzaron contra la costa. Al cabo de 10 ó 15 minutos las aguas volvieron a retirarse haciendo el mismo y atemorizador ruido. Una hora más tarde, una tercera ola mayor que las dos anteriores se abatió sobre Corral; medía de 9 a 11 metros de alto y se desplazaba a una velocidad de 100 km por hora aproximadamente. Otros tsunamis de menor envergadura la siguieron, pero éste fue el último de los tsunamis destructivos: en Corral ya no quedaba nada por destruir.

En el interior del país, muchos valles quedaron obturados por corrimientos de tierras y durante varias semanas existió el peligro de que se produjesen catastróficas inundaciones. Se esperaba con ansiedad que esos diques naturales temporales se colapsasen ante el peso del agua que retenían tras ellos. Se trabajó frenéticamente durante dos meses para evacuar el exceso de agua que se había acumulado en el Lago Rinihue debido a un deslizamiento que bloqueaba su desagüe natural. Las autoridades estaban recelosas porque Valdivia ya había sido destruida en 1575 por una catástrofe de parecidas características. Un gran canal practicado en el seno de la

masa deslizada permitió que las aguas escapasen bajo control humano. En los Andes, el terremoto desencadenó miles de corrimientos de tierras y avalanchas. Tazieff y sus compañeros, al estudiar los corrimientos que habían sepultado centenares de familias de granjeros en sus propias tierras de labor, quedaron muy sorprendidos por las enormes distancias recorridas por las masas deslizadas. Era indudable que, bajo la influencia de intensas vibraciones del suelo, las masas deslizadas podían mantener su movimiento (permanecían en estado fluidificado) a lo largo de distancias mucho mayores que las que recorrerían bajo condiciones estáticas normales; debido a ello, las coladas de fango y derrubios se habían desplazado por el fondo de los valles a lo largo de distancias cinco o seis veces mayores que la altura de la cicatriz de la que procedían. Actualmente se sabe que los corrimientos de tierras y las avalanchas de origen sísmico pueden desplazarse más rápidamente y recorrer distancias mucho mayores que los corrimientos y avalanchas que se producen bajo condiciones normales en las regiones montañosas; por lo tanto, los corrimientos y avalanchas sísmicas tienen un potencial destructivo mucho mayor e incluso más terrorífico que el de los lentos corrimientos y mortíferas avalanchas con los que la mayoría de la gente está familiarizada. Mientras intentaban alcanzar la fisura eruptiva al noroeste del volcán Puyehue, que había despedido lava andesítica dos días después del terremoto, Tazieff y su equipo se vieron obligados a cruzar el valle del río Gogol. Aquí, en la alta cordillera, vieron deslizamientos de proporciones gigantescas que afectaban a montañas enteras; otros que se habían iniciado con menores proporciones, habían arrasado numerosas áreas de bosque con tremendas avalanchas de rocas. Los habitantes hablaban de las "colinas andantes" que habían sepultado a cien peones en su campamento, al este del Lago Rupanco, habían arrojado al hotel (con el personal incluido) al propio lago y habían sepultado en breves instantes a numerosos campesinos bajo miles de toneladas de tierra y piedras.

En muchas partes de la región afectada por los terremotos del año 1960, el suelo quedó fisurado iniciándose complejos movimientos de subsidencia o alzamiento relativos. Muchos kilómetros cuadrados de territorio previamente emergidos quedaron inundados para siempre por los ríos y el mar, especialmente en la zona de Valdivia, en los alrededores de Maullin y en el sector oriental de la isla de Chiloe. Incluso después de haberlo verificado una y otra vez, a Tazieff le resultaba difícil creer que una extensa faja de terreno de 30 kilómetros de ancho por 500 kilómetros de largo se había hundido bajo las aguas hasta una profundidad de 2 a 3 metros en tan sólo 10 segundos. En la mayoría de los casos, los edificios situados sobre roca firme resistieron mejor que los ubicados sobre aluviones, materiales de relleno no consolidados, llanuras costeras o suelos pantanosos. Los edificios construidos a partir del año 1939, y que habían sido edificados atendiendo a unas normas de seguridad especiales, resistieron bastante bien el terremoto. En cambio, prácticamente todas las construcciones anteriores edificadas de cualquier manera se derrumbaron. En los edificios "sismorresistentes" los mayores daños fueron causados por la caída de pesadas lámparas y por aplastamiento por los muebles sueltos que se hallaban en su interior.

Para darnos cuenta plenamente de las enormes proporciones de este terrible terremoto tal vez sea conveniente imaginar que el mismo ocurriese más cerca de nuestra propia casa. La faja de terreno que se hundió bajo las aguas iría desde Canberra hasta Melbourne si nos situásemos en Australia, desde París a Burdeos en Francia, desde Glasgow a Oxford en Inglaterra, y desde Memphis a Nueva Orleans en Estados Unidos.

Es evidente que la impresión que los grandes terremotos causan en los hombres depende en gran medida de las condiciones ambientales del lugar en que se producen. En zonas poco pobladas alejadas de las grandes ciudades los riesgos derivados de un terremoto pueden ser muy distintos de los que experimentaron los habitantes de Lisboa en 1775, los de San Francisco en 1906, los del sur de Chile en 1960, o los de Tientsin en 1976. Así, la tarde del día 15 de agosto de 1950, los sismógrafos de todo el mundo detectaron un terremoto de gran intensidad centrado en Assam, en el Himalaya, cerca de la frontera entre la India y el Tibet (de hecho, la intensidad de ese seísmo es la mayor que ha sido registrada instrumentalmente hasta la fecha). Probablemente, el terremoto de Assam fue originado por una ruptura masiva de rocas a una profundidad de 13 kilómetros aproximadamente; dicha ruptura provocó movimientos relativos entre diferentes bloques corticales a lo largo de fallas en un sector en que la cadena montañosa forma un ángulo recto. Los temblores tardíos, algunos de ellos de magnitudes considerables, se prolongaron por espacio de unos dos meses; ese debió ser el tiempo que necesitaron los distintos bloques para reajustarse después de la sacudida principal. Los intensos temblores de tierra y las inundaciones que les siguieron afectaron una área de 120.000 kilómetros cuadrados que se extendía desde la India hasta el noreste del Tibet, a lo largo del valle del río Brahmaputra. Muy pocos edificios quedaron en pie en la región. Según Ernest Tillotson, la mayor parte de las riberas a ambas orillas del río sufrieron hundimientos considerables, de hasta 1,5 a 2 metros en algunos sitios. Las carreteras se doblaron, se abombaron y se rompieron quedando prácticamente destruidas. El levantamiento y las inundaciones de los terrenos agrícolas motivaron que la cosecha de arroz fuese de las peores que se recuerdan. Ya era demasiado tarde para volver a plantar. Por doquier flotaban miríadas de peces muertos. La presa del río Brahmaputra, al norte de

Pasighat, cedió causando graves inundaciones. El río Subabsiri fue obstruido por una masa de rocas caídas precisamente en un lugar en que el mismo discurre a través de unas gargantas de 300 metros de altura; cuando esa presa natural se rompió, la visión debió ser dantesca. Los daños materiales fueron muy elevados, pero no se perdieron excesivas vidas humanas (entre 1.500 y 2.000 personas) gracias a que en la zona más afectada no había ninguna gran ciudad. El naturalista británico F. Kingdon-Ward estaba acampado en el norte de Assam cuando el terremoto se produjo; a su pluma le debemos una de las más dramáticas narraciones acerca de lo que sucede en la zona epicentral de un gran terremoto.

El 15 de agosto de 1950, Kingdon-Ward y su esposa se hallaban acampados en el pueblo de Rima, en la orilla izquierda del río Lohit, a 1.525 metros de altura sobre el nivel del mar (Rima no es en realidad el nombre de un pueblo sino de un pequeño distrito en el que hay cinco o seis aldeas con casas hechas de madera, y en las que vive una población total estimada de unos pocos cientos de personas). Las terrazas de cultivo están dominadas por altas y escarpadas montañas cuyas cimas, ya en la frontera con Birmania, están cubiertas por nieves perpetuas; esas montañas se extienden en un radio de 40 kilómetros y superan los 5.700 metros de altura. A tan sólo 6 kilómetros del río en línea recta ya alcanzan los 4.500 metros de altura. Alrededor de las 8 de la tarde, hora local, escasamente tres cuartos de hora después que el oscuro manto de una noche cálida se había abatido sobre Rima, Kingdon-Ward estaba sentado bajo un cielo estrellado a la entrada de su tienda, escribiendo su diario. Su mujer ya se había acostado, y los sirvientes estaban en su propia tienda. De repente, tras un leve temblor, se oyó un aterrador ruido y la tierra empezó a vibrar violentamente; Kingdon-Ward se puso de pie y miró hacia el horizonte; los contornos del paisaje, aún visibles contra el cielo estrellado, aparecían confusos; todos los árboles y todas las colinas se veían borrosos, como si se estuviesen moviendo rápidamente arriba y abajo; al cabo de 15 ó 20 segundos se dio cuenta de que aquello era un terremoto. Su mujer se le adelantó y gritó "¡Terremoto!"; en un abrir y cerrar de ojos saltó de la cama. Descolgaron la lámpara de aceite para evitar que al caer prendiese fuego a la tienda y la colocaron en el suelo. Inmediatamente fueron tirados al suelo; la lámpara también se tumbó y, al caer, se apagó.

Para ellos fue difícil explicar y resumir lo que sintieron durante los cuatro o cinco minutos que duró el terremoto; pero la sensación inicial de perplejidad —la incredulidad ante un fenómeno que sacudía a las montañas y a ellos mismos como un perro sacude a una rata— pronto dio paso al más tremendo de los pánicos. No obstante, tumbados sobre la arena el uno al lado del otro empezaron a hablar tranquilamente con sus dos sirvientes

sherpas, quienes al ser derribados dos veces estaban tumbados en la arena junto a ellos.

En el clímax del terremoto daba la sensación a los cuatro viajeros estirados en el suelo de que una poderosísima fuerza estaba golpeando la tierra debajo de sus pies con la persistencia de un hombre que aporrea un tambor. Kingdon-Ward tuvo la sensación de que una delgada costra se había roto en el fondo de la cuenca en que ellos se hallaban; y parecía como si todos estuviesen cayendo a través de un inmenso agujero hacia el interior de la Tierra. El ruido era ensordecedor; era realmente difícil diferenciar el ruido hecho por el propio terremoto del rugido de las avalanchas que caían hacia el centro de la cuenca desde todas las direcciones.

Poco a poco, el ruido de las rocas rompiéndose y entrechocando empezó a ser más fácilmente discernible, las vibraciones disminuyeron paulatinamente y el ensordecedor ruido de tambores batiendo se fue debilitando: sabían que la sacudida principal había pasado. Sin embargo, un fuerte estruendo, o una serie de estruendos que nada tenían que ver con el entrechocar de rocas, marcó el auténtico final del terremoto. Procedente de lo alto del cielo, en dirección al noroeste (o al menos eso es lo que parecía), se oyó una rápida sucesión de explosiones cortas y secas, como de una metralleta antiaérea. Esos ruidos eran como "estallidos de roca", es decir, roturas explosivas de grandes cuerpos rocosos bajo los esfuerzos a que les estaban sometiendo los movimientos de la tierra. Fue el "alto el fuego".

Al cabo de media hora aproximadamente, Kingdon-Ward y su mujer volvieron a la tienda. Observaron que el despertador y el reloj de pulsera seguían funcionando; el altímetro aún marcaba 1.525 metros y el termómetro exterior señalaba 73° F. Excepto un vaso que se había caído, en el interior de la tienda todo estaba en su sitio. Las tiendas estaban plantadas en un pequeño banco de arena a unos 550 metros de la terraza alta del torrente de La Ti y más próximas a éste que al propio río Lohit. La vertiente de la colina más cercana se hallaba unos 300 ó 350 metros hacia el este; en ella no se produjo ningún deslizamiento de importancia; en todo caso no cayó ni una sola piedra ni sobre la tienda ni sobre la aldea vecina. ¡No hubieran podido elegir un lugar más seguro! Durante las dos horas siguientes, el aire estaba tan cargado de polvo que ni siquiera se podían ver las estrellas; el polvo les llenó los ojos, la nariz, la boca, las orejas y los pulmones. Durante una semana, todas las hojas de todos los árboles estuvieron cubiertas de polvo. Violentos temblores se prolongaron durante toda la noche, y el pequeño equipo tuvo que abandonar sus tiendas en otras dos ocasiones. De todos modos, ni ellos ni las tiendas sufrieron el menor daño.

Tan pronto como se hizo de día, se vistieron y salieron a ver qué es lo que había sucedido. En la aldea todos los tejados se habían derrumbado. El

canal de riego principal estaba obstruido; muy pronto los campos de arroz quedarían secos. Grandes fisuras, en su mayoría paralelas a las orillas del río, se habían abierto en los afloramientos rocosos. En algunos lugares, las fisuras estaban muy juntas, mientras que en otros lugares estaban bastante separadas; al parecer esto dependía de si el suelo era arenoso o arcilloso. Estas grietas no solían tener más que unos pocos centímetros de anchura y alrededor de 1 metro de profundidad. Aquí y allá había pequeñas porciones de terreno que se habían hundido. El torrente de La Ti era una cosa digna de ser vista. El día anterior, sus aguas, de un bello color azul verdoso, eran tan claras y transparentes que permitían ver las piedras del fondo mientras se deslizaban rápidamente río abajo; después del terremoto, bajaban tan sucias y espesas que parecían café con leche. Su nivel había subido más de un metro y el crujir de las piedras sumergidas resonaba horriblemente. El agua olía desagradablemente a fango.

Día tras día, noche tras noche, los temblores se sucedían uno tras otro. Algunos de ellos, precedidos por un corto rugido, eran bastante fuertes, como el estallido de un trueno lejano. Las aguas ya no eran frías sino tibias. Algunos días soplaba una ligera brisa del sur, tan cargada de finísimas partículas de polvo que no aliviaba en nada el bochorno que se había apoderado de la cuenca del Rima. Cada día hacia mediodía, cuando empezaban a caer nuevas avalanchas, se formaba una densa nube de polvo que oscurecía el Sol, que parecía un disco de cobre. La visibilidad oscilaba entre 1 y 3 kilómetros. En Rima no hubo ni una sola víctima humana; no obstante, algunos animales domésticos fueron heridos o murieron al ser aplastados al caer algunos árboles. En el río se produjo una gran mortandad piscícola; la gente pudo sacar muy pocos peces de las embravecidas aguas. La indiferencia, o el fatalismo, eran la nota dominante entre la población local (de confesión budista). El día después del terremoto fueron a trabajar a los campos como si nada hubiese sucedido; incluso daba la impresión de que algunos creían que iba a producirse una repetición de la sacudida principal en la que todos morirían. Kingdon-Ward y su grupo no pudieron encontrar a una sola persona que recordase haber vivido previamente algún otro terremoto. Mientras sus hogares estuvieron expuestos a las inclemencias del tiempo, los rimenses se las ingeniaron para construirse refugios provisionales y por las noches reparaban los tejados. Al cabo de quince días, la aldea había recuperado su aspecto habitual.

Los efectos del terremoto eran claramente visibles en las montañas que rodeaban la cuenca de Rima. Amplias fajas de terreno habían sufrido grandes desgarrones, arrastrando consigo árboles y rocas; acantilados enteros se habían derrumbado; por todas partes las rocas continuaban cayendo hacia el fondo de los barrancos. En el valle principal del Lohit los daños

eran cuantiosos, pero en los pequeños valles tributarios (en los que cada curso de agua tenía que atravesar una estrecha garganta de cientos de metros de profundidad) eran infinitamente superiores. La destrucción alcanzó incluso a las cimas más altas (más de 4.500 metros sobre el nivel del mar) No era de extrañar que la mayoría de torrentes empezaran a fluir intermitentemente al quedar obstruidos por los tapones de rocas y tierra que se habían formado en las gargantas; al romperse esos diques naturales, las aguas bajaban impetuosas por los barrancos arrastrando consigo todo lo que hallaban por delante y dejando tras de sí una estela de fango maloliente. ¡Los Kingdon-Ward, sus sirvientes y los aldeanos habían sobrevivido a uno de los mayores terremotos de la historia!

V. CUANDO LAS ROCAS SE FUNDEN

Así desde el sur, hay una espada de fuego.
La diabólica espada de la muerte reluce como el Sol.
Las cumbres se desgarran, los valles se hunden.
Los moradores del infierno se abalanzan, los cielos se caen.
El aullido del mastín infernal retumba en el hoyo de la fosa.
Los grilletes se partirán y el lobo galopa libre.

Sagas islandesas

En 1658, los franceses y los caribes estaban luchando encarnizadamente al norte de la isla de Martinica. Al final, después de una batalla encarnizada en la que quedaron despiadadamente diezmados, los orgullosos caribes se arrojaban desde lo alto de un acantilado para evitar la desgracia de caer en manos de sus enemigos. Este acantilado está situado en una colina llamada "Tumba de los Caribes", cercana a la costa y a unos kilómetros de la ciudad de St. Pierre. Antes de autoinmolarse los caribes invocaban a sus dioses y exclamaban: "La Montaña de Fuego nos vengará".

Y efectivamente, el 8 de mayo de 1902 el Mont Pelée, la Montaña de Fuego, les vengó. El 2 de febrero de 1902 los habitantes de Le Prêcheur, un pequeño pueblo costero situado 8 kilómetros al noroeste de St. Pierre, empezaron a percibir un olor a azufre cada vez más penetrante. Más avanzado el mes, los vapores empezaron a provocar la muerte de los pájaros, cuyos cuerpos quedaban esparcidos por la colina. En algunos lugares, incluso los caballos denotaban cierta inquietud. Estas manifestaciones se prolongaron, incrementadas, hasta el día 23 de abril, cuando a las ocho de la mañana, un fuerte terremoto sacudió St. Pierre y los pueblos vecinos. Al día siguiente se oyó un fuerte ruido, como de un gran choque, seguido por

otros ruidos más apagados que parecían salir de las entrañas de la Tierra. La mañana del día 25 amaneció nublada y con el cielo totalmente oscurecido, como si se estuviese produciendo un eclipse de Sol; entonces se oyó como un cañonazo y el cielo se encendió súbitamente. Durante algunas horas, una lluvia incandescente de cenizas volcánicas estuvo cayendo sobre las ciudades y pueblos de la falda del Mont Pelée, aterrorizando a la población pero causando en realidad muy pocos daños. A las diez de la noche otro terremoto sacudió la isla.

El domingo 27 de abril se celebró la primera ronda de las elecciones legislativas sin que ningún grupo alcanzase la mayoría absoluta; se decidió celebrar una segunda ronda el día 11 de mayo. Más tarde se dijo que esas inquietudes políticas fueron la razón principal por la que las autoridades de la ciudad decidieron no evacuarla. Y lo que es más, algunos informes sugieren que incluso se cerraron los accesos a St. Pierre para evitar la huida de la población: los políticos deseaban, en su propio interés, alcanzar una mayoría lo más amplia posible. Ni tan siquiera se hizo caso de la aparición de caudalosos ríos que se formaron en la ladera de la montaña.

El mes de mayo se inició con más terremotos y más lluvias de cenizas y escorias volcánicas. La zona de Le Prêcheur quedó cubierta por una capa de cenizas de algunos centímetros de espesor; la gente empezó a abandonar los pueblos de los alrededores y a dirigirse hacia St. Pierre. El día 2 de mayo, el periódico local *The Colonies* anunciaba una excursión para ir a contemplar la erupción:

> La gran excursión al Mont Pelée, organizada por la Sociedad Gimnástica y de Caza, tendrá lugar el próximo domingo, día 4 de mayo. Todos aquellos que nunca hayan contemplado el maravilloso panorama que se ofrece a los ojos admirados de los visitantes desde una altura de 1.400 metros, y todos aquellos que deseen ver el tremendo agujero del que, en estos últimos días, salen las espesas nubes que tanto han afectado a los habitantes de Le Prêcheur y Saint-Philomene, no deben desaprovechar esta magnífica oportunidad. Si el tiempo no lo impide, los excursionistas gozarán de un día que será recordado con satisfacción durante muchos años.

A las 11.30 de la noche del día 2 de mayo la ciudad durmiente fue despertada por una serie de sordas detonaciones; al mismo tiempo, una enorme y negra columna de cenizas y material incandescente se formó en la cima de la montaña; los alrededores se cubrieron de fragmentos de piedra pómez y cenizas que el viento empujó hasta Fort de France, a 32 kilómetros de distancia. Aquella noche, una multitud que estaba siendo presa del pánico recibió la sagrada comunión. La erupción había adquirido en aquellos momentos una violencia inusitada y del cráter salían despedidos grandes bloques de roca hasta más de dos kilómetros de distancia. En St. Pierre, la gente tosía y respiraba con dificultades, sumergida en una atmósfera sofocante que imposibilitaba la circulación de los tranvías; la ciudad quedó rápidamente cubierta por una fina capa de cenizas; el día 3 de mayo, el gentío se dirigió a la catedral pidiendo la absolución; naturalmente, la gran excursión prevista para el día siguiente fue cancelada.

El domingo día 4, un nuevo cráter se abrió en la ladera del volcán, y la Rivière Blanche que, pocas horas antes, bajaba enormemente crecida, se secó. Entonces, uno de los cráteres despidió una enorme masa de fango que llenó la seca Rivière Blanche convirtiéndola en un furioso torrente de barro negro que arrastraba enormes bloques con un ruido ensordecedor; antes de desembocar en el mar, el torrente recién formado arrastró a la destilería Guerin como si fuese un bulldozer; murieron 23 personas. En el mar se formaron grandes olas que al romper en la playa de St. Pierre destrozaron numerosas embarcaciones e inundaron la Place Bertin. Tal violencia volcánica se mantuvo sin desfallecer durante toda la noche y el día siguiente; coladas de fango torrenciales invadieron los valles y las cenizas volcánicas cubrieron toda la región.

El miércoles día 7 ocurrió en la cercana isla de St. Vincent un hecho que debía haber servido de lección a los habitantes de St. Pierre; una erupción del volcán de la Soufrière lanzó una nube incandescente de gas y fragmentos rocosos pulverizados que quemó totalmente el bosque y provocó la muerte de 1.565 personas en el área de Georgetown. No obstante, el mismo día, y aprovechando un período de calma relativa en la erupción del Mont Pelée, se difundió en Martinica el siguiente comunicado: "Según las observaciones efectuadas, la intensidad de la erupción está disminuyendo palpablemente. Esta mañana la altura de la columna de cenizas era de tan sólo 2.400 metros, mientras que el domingo por la noche medía unos 5.200 metros. Las coladas de fango caliente de los valles de la Rivière Blanche ya no alcanzan el mar. Muchos turistas se han ido a visitar el cráter." El gobierno había encargado a un grupo de científicos el estudio de las características de la erupción del Mont Pelée. Este grupo, dirigido por el teniente-coronel Gerbault, un técnico y especialista en artillería, estaba compuesto por un oficial farmacéutico del ejército colonial, por un ingeniero del gobierno civil, y por dos profesores de ciencias naturales del instituto de St. Pierre. Más tarde, uno de esos dos profesores hizo público otro comunicado: "Según mi opinión, el Mont Pelée no representa para St. Pierre una amenaza mayor de la que el Vesubio representa para Nápoles." Sin embargo, Nápoles está a 10 kilómetros del Vesubio, mientras que St. Pierre está a tan sólo 7 kilómetros del Mont Pelée; por lo que, a pesar de los tranquilizadores comunicados oficiales, el pánico se apoderó de la población y aquella misma tarde se empezaron a construir barricadas.

En este estado de cosas, el gobernador decidió efectuar una visita a St. Pierre para calmar a la población; después de todo, se estaban acercando las elecciones. Fue, pero nunca volvió. Aquella noche las detonaciones continuaron oyéndose, y las cenizas, mezcladas con una lluvia torrencial, siguieron cayendo sobre la ciudad. Alrededor de las 4 de la madrugada del día 8 de mayo se produjo otro breve período de calma en la actividad volcánica, hecho que fue aprovechado por la gente presa del pánico para recoger apresuradamente sus pertenencias y escapar al amanecer del día siguiente; otros se fueron hacia el puerto para intentar apoderarse de algunas embarcaciones. La situación estaba fuera de control.

Al alba, un límpido cielo saludó a la ciudad, que había sido lavada por las torrenciales lluvias. Era el día de la Ascensión y la campana del Ángelus estaba sonando. La gente se apiñaba en la iglesia. Sin embargo, el tiempo se estaba agotando. A las 7.50 de la mañana se oyó una terrible explosión en el flanco oeste del volcán.

Un observador situado en el mar explicó que al producirse la explosión la montaña pareció rajarse de arriba a abajo. Mientras una oscura nube se levantaba por encima del pico, otra nube se precipitó como un huracán a través de un desfiladero en la vertiente del volcán para dirigirse, acto seguido, hacia St. Pierre (lámina 13). Alrededor de las 7.53 de la mañana ya había cubierto por completo la ciudad. No hubo supervivientes. La terrible nube ardiente (*nuée ardente*) abrasó la ciudad y todo lo que halló a su paso, como si se tratase de una bomba atómica. El balance fue terrorífico: murieron 28.000 personas. El "Pequeño París del Caribe" había quedado convertido en un montón de ruinas (láminas 14 y 15). Grandes fragmentos de la catedral habían sido desplazados muchos metros; una de sus torres había sido partida por la mitad. En el mar, las embarcaciones estaban ardiendo y se hundían lentamente en las tranquilas aguas. Los restos del multitudinario naufragio yacían sobre la playa.

Cuando los primeros equipos de rescate llegaron a la ciudad, el pútrido hedor de la carne en descomposición se mezclaba con el acre olor que emanaba de los cuerpos humanos quemados (lámina 16). En la zona más intensamente afectada por el holocausto hubo un solo superviviente. Augustus Cyparis, nativo de Le Prêcheur, había sido encarcelado por haber participado en una riña callejera. Ya casi había cumplido su condena cuando, deseoso de asistir a una fiesta local, se las ingenió para escaparse de la guardia cuando le transportaban a la ciudad. Al término de la fiesta, Cyparis se entregó y eso le valió ocho días en el calabozo. Paradójicamente, el castigo salvó a Cyparis de una muerte cierta. Tres días después de la tragedia, cuando ya estaba convencido de que había llegado el fin del mundo, los equipos de rescate le hallaron en su calabozo, con el cuerpo lleno de

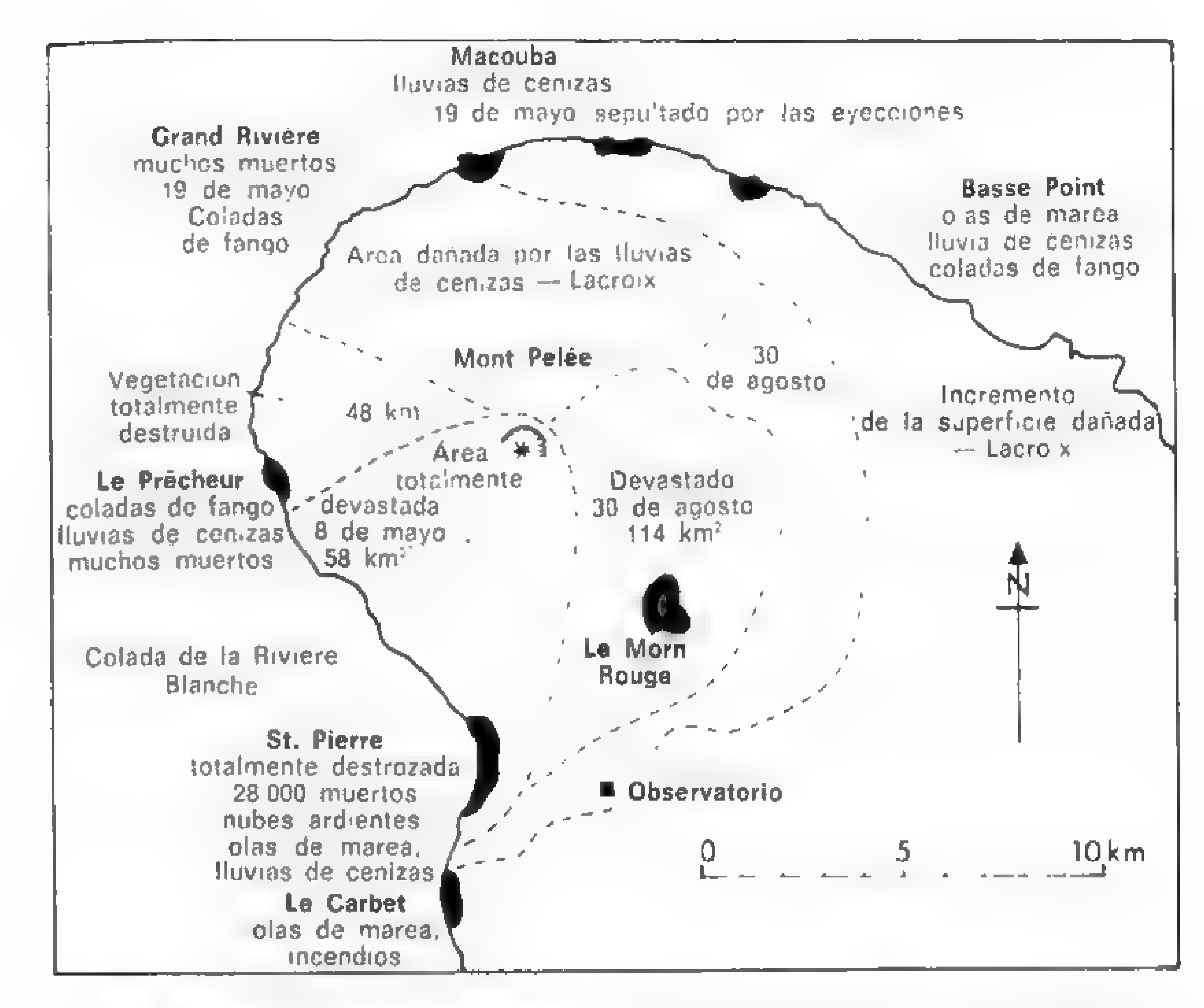


Fig. 20. Mapa de riesgos volcánicos de la zona ocupada por el Mont Pelee, al norte de la Martinica, en las Pequeñas Antillas. Este mapa muestra la extensión y la magnitud de los daños causados por la catastrófica erupción del año 1902. El número de muertos y los daños materiales causados por una erupción de las mismas características serían hoy en día mucho mayores que los ocasionados por la erupción del año 1902, especialmente si la población no fuese evacuada antes del clímax de la erupción

quemaduras (más tarde, un circo ambulante le contrataría para que exhibiera sus cicatrices al público). Su calabozo aún puede ser visitado debajo de las ruinas del teatro de St. Pierre; está construido con grandes bloques de piedra y tan sólo tiene dos pequeñas ventanas; se parece más bien a un refugio contra bombardeos.

En el caso de la tragedia de St. Pierre, la erupción fue la responsable directa del elevado número de pérdidas de vidas humanas. Sin embargo, los efectos secundarios de una erupción volcánica pueden tener asimismo consecuencias catastróficas; eso es lo que ocurrió en la erupción del volcán

Krakatoa el año 1883; los gigantescos tsunamis generados por la erupción destruyeron gran cantidad de pueblos costeros en Indonesia, causando gran número de víctimas, el cual se vio acrecentado por las epidemias y el hambre que siguieron, añadiendo una nueva dimensión a la catástrofe.

La tremenda erupción del Krakatoa es uno de los ejemplos más ilustrativos de una erupción volcánica ocurrida en tiempos históricos; la isla desapareció como consecuencia de la violenta explosión y muchos miles de personas murieron; el mundo entero se dio cuenta inesperadamente de las enormes proporciones que podía adquirir la violencia volcánica. Krakatoa está situada en el centro de los Estrechos de la Sonda, en el extremo occidental de Java, aproximadamente a mitad de camino entre las costas de Java y Sumatra, y a unos 32 kilómetros de las mismas. Estos angostos estrechos constituían una de las principales vías de navegación del siglo XIX en el Pacífico; por ellos pasaban los barcos que iban desde Batavia (ahora Yakarta) hasta Europa, o viceversa, a través del océano Índico. La gran cantidad de información de que disponemos acerca de la erupción del año 1883 se debe precisamente al elevado número de buques que navegaban por esas aguas.

El trazado de las líneas de costa era bien conocido gracias a los reconocimientos efectuados por los hidrógrafos navales de la época, especialmente por los ingleses y los holandeses, cuyos respectivos países mantenían un intenso tráfico comercial en la región. Se cree que el nombre de Krakatoa procede de una deformación de Rakata, un volcán de 812 metros de altura situado en el extremo sur de la isla más grande del archipiélago. Al norte de Rakata está situado Danan, otro volcán, de 450 metros de altura, y al noroeste de Danan hay aún otro volcán más bajo, de tan sólo 120 metros de altura, llamado Perboewetan. Al noreste de la isla mayor estaba situada la isla de Lang, y al noroeste la de Verlaten. Media milla al oeste de Lang había otra pequeña isla con el curioso nombre de *Polish Hat* (Sombrero Polaco). Rakata parecía ser el más joven de los tres volcanes; en sus flancos eran claramente visibles coladas de lavas con aspecto fresco. Entre 1680 y 1681 se produjeron algunas erupciones en Krakatoa, y posiblemente gran parte del cono de Rakata se formó durante las mismas. Los otros conos volcánicos estaban asociados con lavas más antiguas y no se sabe apenas nada acerca de su pasado. Todas las islas estaban deshabitadas aunque eran visitadas periódicamente por gentes de las islas vecinas que iban a buscar madera que había con exuberancia en las frondosas selvas tropicales que cubrían dichas islas. Ciertamente, Krakatoa era una isla tropical excepcionalmente bella —un jardín del paraíso— que suscitaba oleadas de admiración entre los pasajeros de los barcos que la avizoraban. Muy pronto se convertiría en un "agujero del infierno".

Durante la década de los 70, en el siglo pasado, la región de los Estrechos de la Sonda se vio afectada por algunos terremotos, pero nadie les prestó excesiva atención. De hecho, los temblores de tierra eran relativamente frecuentes en la región (es interesante recordar que, antes de su destrucción total en el año 79, Pompeya también se vio afectada por una larga secuencia de terremotos que se iniciaron 16 años antes; también en este caso, estos signos premonitorios fueron ignorados). Tal y como suele suceder en las erupciones volcánicas, la frecuencia y la intensidad de los temblores en los Estrechos de la Sonda fueron aumentando paulatinamente hasta que el día 1 de septiembre de 1880 una sacudida particularmente fuerte causó daños en la estructura de un faro en la costa javanesa. Incluso después de este claro signo premonitorio, la gente siguió normalmente con sus quehaceres. La actividad sísmica se prolongó esporádicamente hasta el año 1883, pero nadie le daba importancia. Sin embargo, el 20 de mayo de 1883, el volcán Rakata entró bruscamente en actividad. Las violentas explosiones se oían a más de 150 kilómetros de distancia; se prolongaron durante horas y dentro de esa área las puertas, las ventanas y los objetos sueltos empezaron a traquetear y bambolearse por la presión del aire al mismo tiempo que en el suelo se formaban ondas vibratorias debido a las explosiones. En los barcos, las agujas de las brújulas se movían descontroladamente. Al día siguiente pudo verse cómo una gran columna de vapor, de unos 10 kilómetros de altura, salía de la isla de Krakatoa; entre tanto, el viento transportaba finas partículas de cenizas volcánicas a más de 500 kilómetros de distancia. El día 22 se formó una enorme masa de vapor en forma de cúpula mientras grandes cantidades de fragmentos de piedra pómez eran lanzadas desde el cráter. La nube resultante de la erupción continuaba ascendiendo hacia lo alto, y por la noche era iluminada intermitentemente por fantasmagóricos rayos y destellos. El día 23 grandes cantidades de piedra pómez flotaban sobre el mar, pero los barcos no corrían ningún peligro. Sin ningún género de dudas, tanto la tripulación como los pasajeros de las embarcaciones que navegaban por los Estrechos de la Sonda durante aquellos días pudieron admirar aquel impresionante despliegue de las fuerzas de la naturaleza. En aquel momento, al parecer, el grado de actividad era muy similar al de las erupciones de 1680 y 1681, con una columna de gases elevándose más de 10.000 metros y considerables cantidades de polvo volcánico que eran transportadas por el viento a 500 kilómetros de distancia.

El 27 de mayo se produjo un período de calma en la actividad volcánica. Esto animó a unos cuantos turistas que se hallaban en Batavia a fletar un bote para ir a ver el volcán desde más cerca. Sin que ellos pudiesen sospecharlo, su viaje iba a tener un considerable valor científico, puesto que a

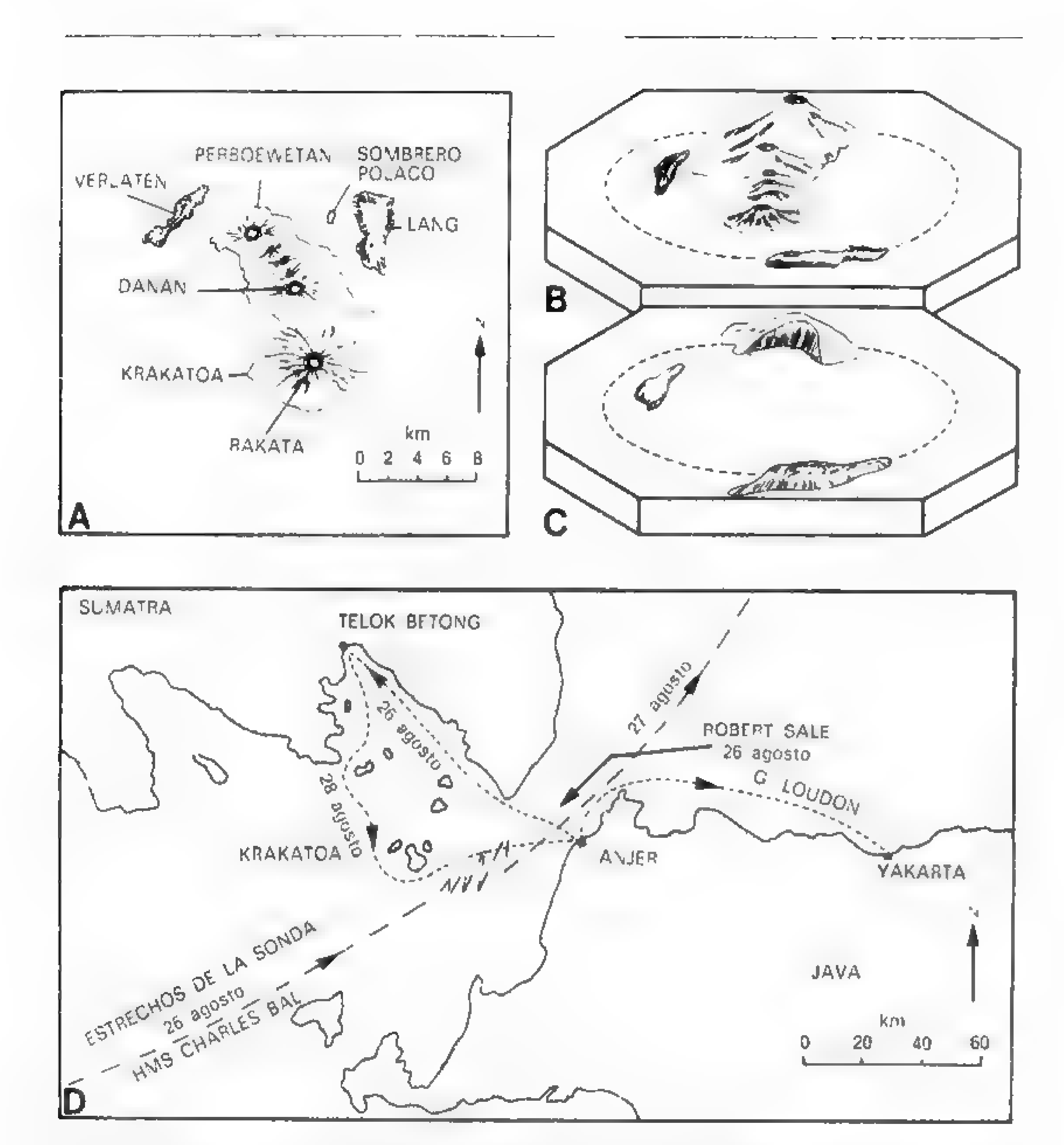


Fig. 21. Durante la catastrófica erupción del volcán Krakatoa en el verano de 1883, muchas de las islas volcánicas previamente existentes desaparecieron dentro de una gran caldera subsidente. El esquema (A) muestra el archipiélago tal y como era antes de 1883, los diagramas de bloque (B) y (C) muestran la visión del archipiélago que tendría un observador situado en un punto elevado al norte de las islas inmediatamente antes e inmediatamente después de la erupción. El mapa (D) indica las rutas seguidas por los tres buques, HMS *Charles Bal*, *Gouvenour-Generaal Loudon* y *Sir Robert Sale*, que surcaron los estrechos de la Sonda los días 26 al 28 de agosto de 1883. Las principales pérdidas en vidas humanas no se debieron a los efectos directos de la erupción, sino a los tsunamis ulteriores que invadieron las fajas costeras adyacentes

ellos les debemos la última descripción detallada de la isla antes de que desapareciese para siempre en el cataclismo que iba a producirse. Oyeron fuertes explosiones procedentes del cono del Perboewetan, que se hallaba en erupción, mientras el resto de Krakatoa y las islas vecinas estaban cubiertas por una gruesa capa de finísimo polvo blanco. En la isla de Verlaten y al norte de Krakatoa, la caída de piedra pómez había arrancado las hojas y las ramas de los árboles y sus troncos resecos permanecían erguidos como solitarios centinelas de un paisaje desolado. Al pisar la playa, los visitantes caminaban entre fango y cenizas que les llegaban hasta el tobillo, y a pesar de que las irregulares explosiones seguían lanzando bloques de piedra pómez procedentes del Perboewetan cada cinco minutos, los expedicionarios consiguieron llegar hasta el propio cráter, en donde pudieron ver cómo ardía la brillante lava. El cráter principal del Perboewetan medía unos 1.000 metros de diámetro y tenía unos 50 metros de profundidad. En el fondo podía verse una galería abierta de la que salía una enorme columna de vapor que se levantaba hasta los 3.000 metros de altura.

Después de esta visita la actividad del Krakatoa declinó marcadamente hasta que, a mediados de junio, la erupción parecía haber cesado por completo. Esta falsa impresión se desvaneció el día 19, cuando una gran pluma de cenizas y vapor se irguió no sólo sobre el Perboewetan sino también sobre el volcán Danan, en el centro de la isla. Las fuertes explosiones que acompañaron a este recrudecimiento de la actividad volcánica provocaron, sin ninguna duda, la desaparición de algunas partes del Perboewetan.

La complaciente actitud de la población de Java y Sumatra a lo largo de todo el mes de julio era algo digno de admirar. A pesar de que extensas regiones eran sacudidas por las explosiones y los terremotos, nadie hacía nada, ni las autoridades ni la población. A comienzos de agosto, otro gran cráter se abrió en la isla de Krakatoa. El delegado del gobierno holandés, capitán Ferzenaar, observó la isla desde el mar el día 11 y vio que la misma ya estaba entonces totalmente desprovista de vegetación. Uno de los cráteres activos estaba aún situado en el lugar ocupado por el antiguo cono del Perboewetan, el segundo estaba a los pies del volcán Danan, en el centro de la isla, y el tercero era el cono principal del Rakata. Además, había otra docena de pequeños cráteres repartidos por toda la isla, de los que salían cenizas y nubes de vapor; precisamente la elevada concentración de humo y vapor impedía efectuar las observaciones más de cerca. Krakatoa había estado en erupción por espacio de 84 días, pero aún no había entrado en la fase más violenta, o fase *pliniana*, de su erupción.

Los detalles posteriores de esta erupción fueron cuidadosamente recopilados después del desastre por todos aquellos que intentaron satisfacer las ansias de información que surgieron en el mundo entero. Los libros de

navegación de los barcos que surcaron las aguas de los Estrechos de la Sonda durante la última semana del mes de agosto de 1883 fueron particularmente útiles en este sentido. En tales libros, todas las observaciones efectuadas por los capitanes de los barcos fueron consignadas con el elevado grado de detalle que les ha hecho justamente famosos.

Entre el 23 y el 26 de agosto se produjo un notable, aunque progresivo, incremento de la violencia de la erupción. El volcán escupió una masa oscura de cenizas y piedra pómez que se elevó más de 27.000 metros sobre el nivel del mar; a intervalos de escasos minutos, las explosiones y los terremotos hacían temblar una y otra vez los edificios. El día 26, el Krakatoa entró en la fase pliniana de la erupción. A partir de las 2 de la tarde empezaron a producirse, cada diez minutos, bruscas detonaciones que podían ser oídas a más de 150 kilómetros de distancia. Hacia las tres de la tarde se experimentaron fuertes vibraciones del aire, que fueron oídas a 240 kilómetros de distancia; al mismo tiempo, la nube de cenizas y gases continuaba creciendo y elevándose. La violencia aún aumentaría más, y hacia las cinco las explosiones eran audibles en toda Java, a distancias de hasta 1.100 kilómetros. En Batavia, a 160 kilómetros de distancia, el ruido era ensordecedor; las ventanas, las puertas, los cuadros y las lámparas de techo crujían y se balanceaban. Grandes fragmentos de piedra pómez caían a muchos kilómetros de distancia del volcán y en sus fisuras podía verse cómo salían coladas de lava incandescente. Violentas tormentas eléctricas iluminaron el cielo durante la noche, mientras la erupción continuaba sin disminuir de intensidad.

Ese mismo día —26 de agosto— el barco inglés HMS *Charles Bal* estaba cruzando los Estrechos de la Sonda en dirección a Hong Kong. A primeras horas de la tarde el barco se hallaba a 10 millas de Krakatoa. El capitán Watson anotó en su libro que ensordecedoras explosiones atronaban incesantemente en el aire, como si se tratase de fuego de artillería. También se oían las frecuentes crepitaciones debidas probablemente a las explosiones de bombas volcánicas cargadas de gases que explotaban en el aire. Hacia las 5 de la tarde las condiciones habían empeorado de tal manera que el capitán Watson, temiendo lo peor, ordenó plegar velas. Grandes fragmentos de piedra pómez bombardearon al *Charles Bal* durante más de una hora: algunos eran tan grandes como calabazas y aún estaban calientes al caer en la cubierta de la nave. Ante tales condiciones para la navegación, el barco se vio obligado a virar hacia el sudeste, situándose a unas 13 millas de distancia de Krakatoa; la visibilidad era prácticamente nula, pero el capitán se sirvió de los resplandores y las llamaradas que salían del volcán para orientarse a modo de faro. La atmósfera estaba cargada de electricidad estática generada por el movimiento de finas partículas de roca y gotitas de

agua formadas por el vapor; esta elevada carga eléctrica se manifestaba en los mástiles y aparejos del barco en forma de fuegos de San Telmo. La tripulación se alarmó creyendo que el fuego iba a caer sobre la cubierta y todo el barco se incendiaría.

La embarcación indonesia *Gouvenour-Generaal Loudon* también se hallaba en aquellos momentos navegando por los Estrechos de la Sonda. Obviamente, las condiciones para la navegación eran muy parecidas a las que estaba experimentando el *Charles Bal*. El *G. G. Loudon* pasó la noche del día 26 de agosto atracado en Telok Betong, al sur de Sumatra. La mañana del 27 su capitán tuvo que renunciar a hacerse a la mar en ruta hacia Anjer debido a la creciente violencia de que hacía gala la erupción. Un tercer barco, el *Sir Robert Sale*, de pabellón inglés, entró por el este en los Estrechos de la Sonda el día 26 confiando en que el día 27 ya podría estar navegando más allá de Krakatoa, pero le fue totalmente imposible.

La noche del 26 al 27 fue terrorífica; cada segundo, desde media noche hasta las 4 de la madrugada, se producían nuevas explosiones. El incesante rugido era ensordecedor. La erupción se estaba acercando a su clímax o punto álgido. A las 5.30 se produjo una enorme explosión probablemente provocada por la entrada de cantidades crecientes de agua marina hacia el interior del cráter (la hora exacta de la explosión fue registrada por todos los barógrafos de las fábricas de gas de Batavia). Sin embargo, esto sería sólo el comienzo. A las 6.44 se produjo otra gran explosión y a las 10.02 otra más, la mayor de todas. El penacho de cenizas se elevaba hasta 80 kilómetros de altura; las cenizas caían sobre un área de 700.000 kilómetros cuadrados. La tercera explosión originó un aumento extraordinario de la presión atmosférica, el cual también fue acusado por los barógrafos de las fábricas de gas de Batavia; en la ciudad, se rompieron los cristales de las ventanas y numerosos muros se agrietaron (la gigantesca erupción del volcán Bezymianni, en Kamchatka, en el año 1956, también generó unas ondas de presión atmosférica parecidas que provocaban dolor de oídos a 50 kilómetros de distancia). A las 10.52 y a las 16.34 se produjeron aún nuevas explosiones cataclísmicas en Krakatoa; sin embargo, éstas serían las últimas, ya que la isla desapareció a consecuencia de las mismas. Las detonaciones asociadas a las cinco explosiones cataclísmicas pudieron ser oídas sobre una amplia zona de la Tierra; en Singapur y Australia los ruidos sonaron aproximadamente como cañonazos. El lugar más lejano en que se oyeron las detonaciones fue la Isla Rodríguez, a 4.800 kilómetros de distancia, en el otro extremo del océano Índico.

Al estar deshabitada la isla, la gigantesca erupción de Krakatoa causó muy pocas víctimas directamente y escasos daños materiales. Fueron los tsunamis originados por las explosiones y por el propio hundimiento de la

isla en la cámara inferior del magma evacuado los que causaron catastróficos estragos en las costas de Java y Sumatra. El primer tsunami azotó la costa aproximadamente a las cinco de la tarde del día 26 de agosto; a lo largo de toda la noche le siguieron grandes olas que contribuyeron a incrementar sensiblemente los destrozos ocasionados por ese primer tsunami. A las 7 de la mañana del día siguiente, en Telok Betong, la cañonera *Berouw* fue sacudida por una serie de grandes olas de más de 25 metros de alto que la arrastraron más de una milla tierra adentro. En los Estrechos de la Sonda, los tsunamis medían entre 20 y 30 metros de altura, y en Merak llegaron a medir más de 40 metros. Unas cuantas millas al sur, en Pepper Bay (Bahía de la Pimienta), los tsunamis se adentraron 16 kilómetros adentro causando terribles estragos. A lo largo de las costas de Java y Sumatra el panorama era desolador: pueblos enteros habían sido borrados de la faz de la Tierra junto con sus habitantes. El puerto de Anjer fue arrasado. En total, las mortíferas olas causaron 86.417 víctimas. Sin embargo, esas olas no eran sino el efecto secundario de la erupción pliniana de Krakatoa.

Las cenizas resultantes de la erupción oscurecieron la luz del Sol en muchos lugares. Las cenizas empezaron a caer sobre Batavia a las 10.39 del día 27 de agosto, 29 horas después de la primera explosión cataclísmica (viajaron, por tanto, a unos 5 kilómetros por hora). A las 12.20 la lluvia de cenizas era tan intensa que ni siquiera podía verse la luz del Sol en aquellas tinieblas infernales. Esta situación persistió hasta la una del mediodía. Poco a poco, una débil luz amarilla volvió a brillar sobre Batavia. A las tres de la tarde la lluvia de cenizas había cesado por completo. Batavia estaba de suerte porque en las zonas más próximas al volcán la oscuridad total se mantuvo durante dos días y medio. Mientras duró la lluvia de cenizas, las tripulaciones del HMS *Charles Bal* y de los otros buques que se hallaban en la zona tuvieron que trabajar constantemente para mantener la cubierta y los aparejos libres de cenizas, cuyo peso podía hacerles escorar. En algunos momentos, las cenizas llegaron a acumularse a un ritmo 15 centímetros cada 10 minutos sobre la cubierta del *Charles Bal*. La actividad volcánica se reanudó hacia las 7 de la tarde del día 27 de agosto, pero a la una de la noche ya se hallaba en franco decaimiento. Finalmente, la erupción terminó, después de 121 días de actividad, a las 2.30 de la madrugada del día 28 de agosto de 1883.

Todo el entramado social y comercial de Java y Sumatra se resintió. Las inmensas balsas flotantes de piedra pómez supusieron durante mucho tiempo un peligro adicional para la navegación; algunas medían 3 metros de espesor y algunos kilómetros de longitud. Un reconocimiento efectuado poco tiempo después por la armada holandesa reveló que el Sombrero Polaco y la mitad norte de Krakatoa habían desaparecido. Todo lo que



Lámina 1. La Tierra vista desde el Apolo-8 el día 24 de diciembre de 1968, durante la primera circumnavegación tripulada de la Luna. A diferencia de sus vecinos espaciales más próximos, la Tierra es un planeta violento con una historia evolutiva larga y compleja. Sin embargo, la vida tal y como la conocemos necesita un hogar con estas características para desarrollarse y prosperar.

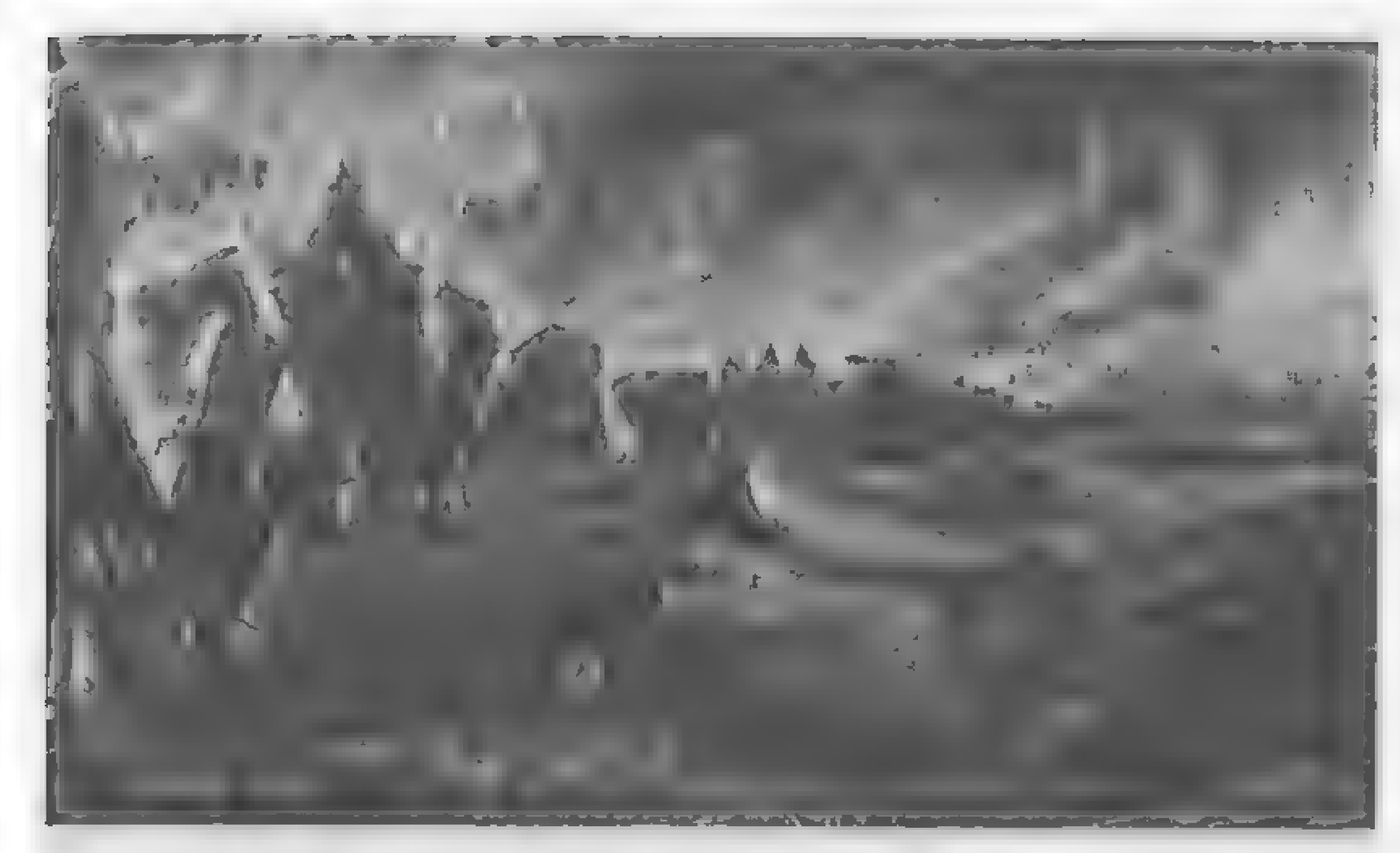


Lámina 3. Un antiguo grabado ilustra la destrucción de Lisboa por el gran terremoto del 1 de noviembre de 1755. La mayoría de cadáveres pertenecían a las personas que se hallaban reunidas en el interior de los templos para celebrar el Día de Todos los Santos. Todas las iglesias se derrumbaron, aplastando a los feligreses. En total hubo entre 10.000 y 15.000 víctimas mortales. Las sacudidas duraron entre 6 y 7 minutos. En el Atlántico Norte se formó un gran tsunami. Probablemente los incendios incontrolados y los brotes epidémicos subsiguientes causaron tantos muertos como el propio terremoto.

◀ **Lámina 2.** Nuestro pasado se conserva en el registro fósil. ¿Qué nos deparará el futuro? Este cráneo fósil, dibujado por M. Hobbs, pertenece a un hombre que murió hace 3 millones de años a orillas del lago Turkana, al norte de Kenia. En aquellos tiempos el este de África era probablemente algo parecido al mítico "Jardín del Edén". Los grupos familiares nómadas de nuestros antepasados llevaban una existencia de cazadores-recolectores en las escasamente habitadas orillas de hermosos lagos tropicales poblados de peces y ríos bordeados de árboles en una sabana silvestre llena de caza. Pero de aquello hace ya mucho tiempo: ¿Sabemos hacia dónde nos dirigimos?

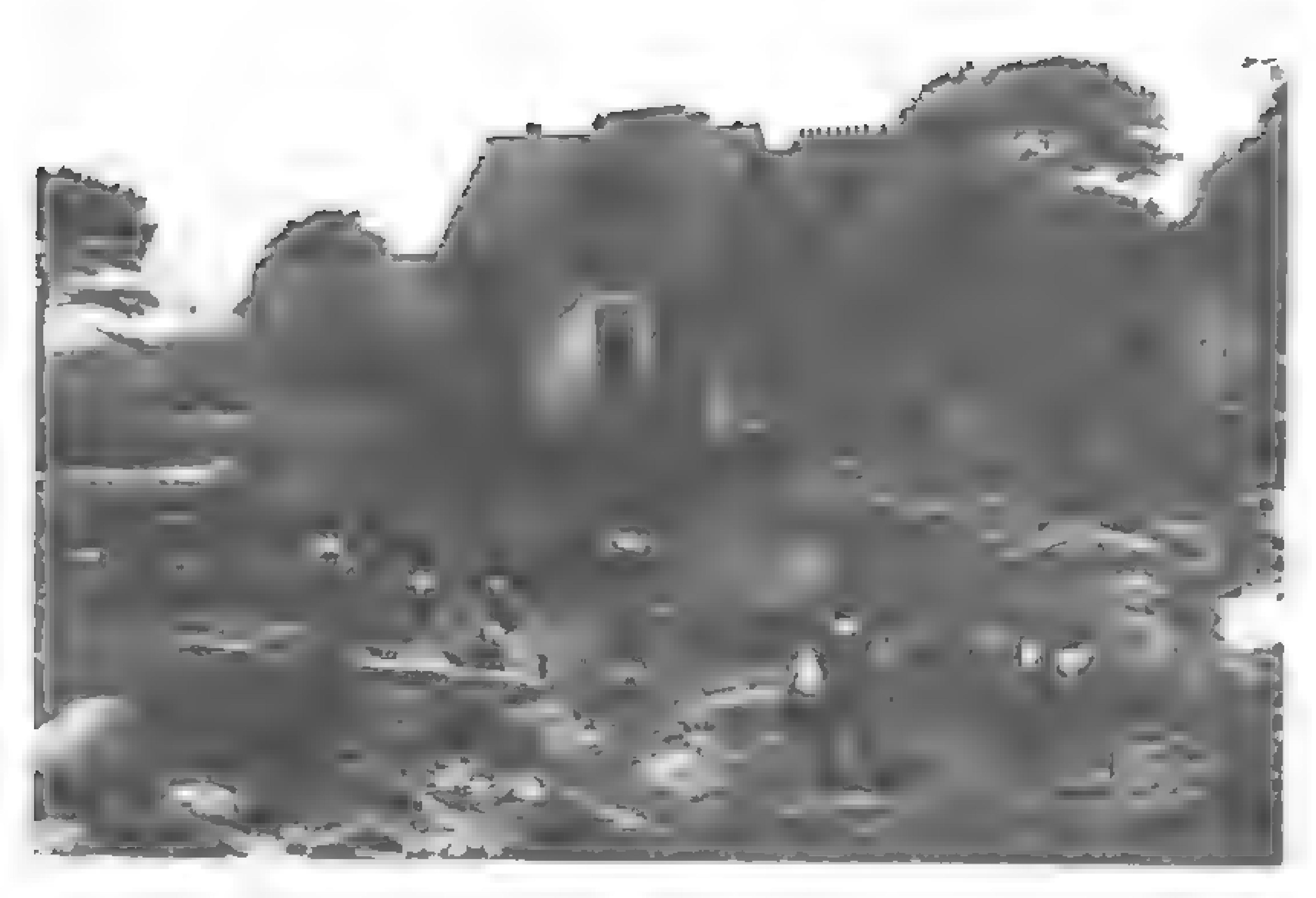


Lámina 4. Una violenta tormenta azotó el sur de Inglaterra al atardecer del día 15 de agosto de 1952. En las tierras altas de Exmoor, al norte del Devonshire, cayeron cantidades excepcionales de lluvia. En Simonsbath se registraron más de 220 litros por metro cuadrado. El río Lyn se transformó en un torrente que se llevó todo por delante en la pequeña ciudad costera de Lynmouth. Treinta y cuatro personas perdieron la vida; la riada también destruyó casas, y dejó las calles llenas de piedras, troncos y, sobre todo, toneladas de fango. Al cabo de 48 horas las aguas volvieron a su cauce, pero la ciudad tardó muchos años en recuperarse de la catástrofe.

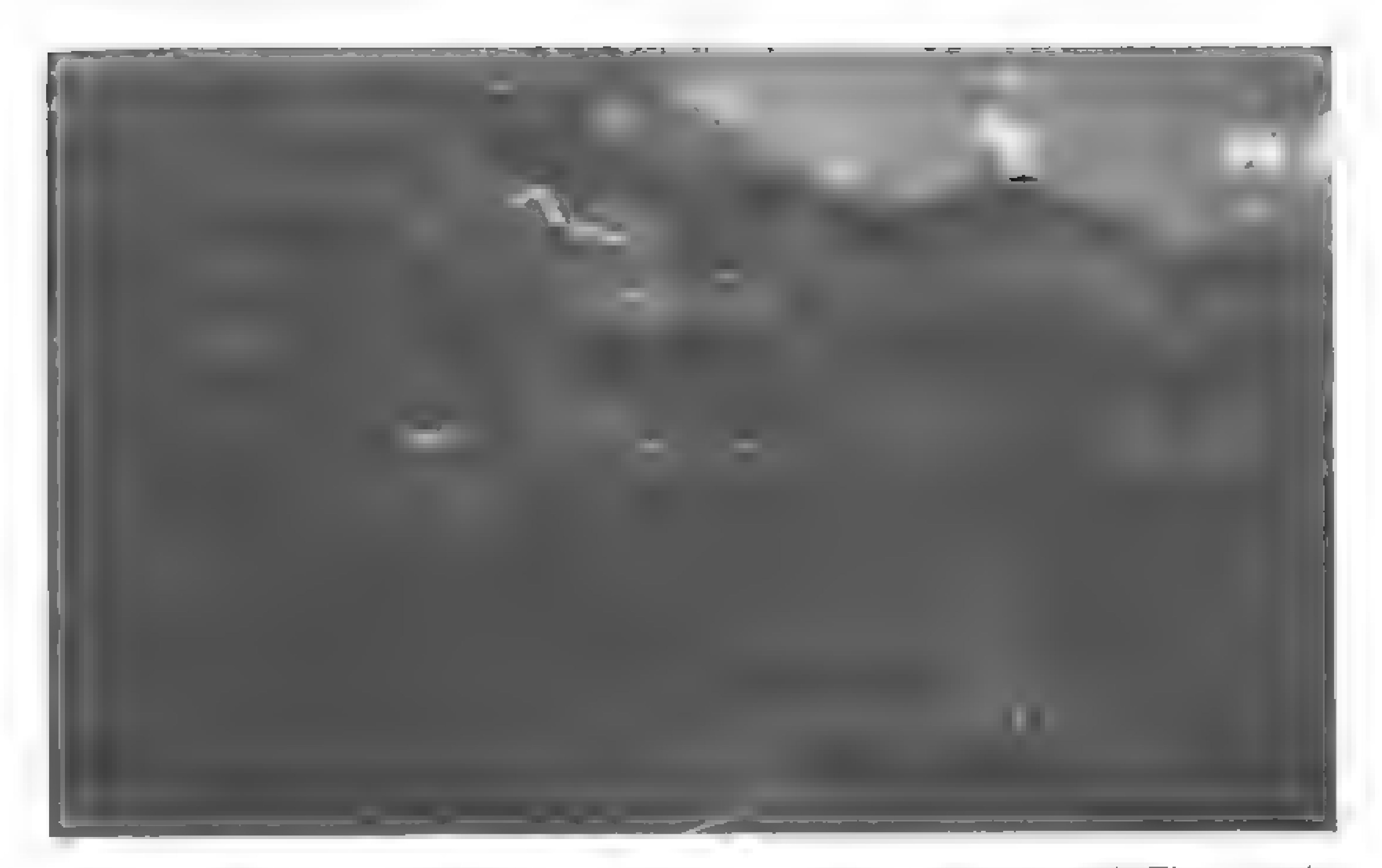


Lámina 5. El registro de las rocas: varias páginas de la historia de la Tierra están escritas en estas montañas suizas. En cada fino estrato han quedado registrados los eventos ocurridos durante su deposición, así como una muestra de las formas de vida locales. Otros episodios de la historia geológica del lugar han sido el plegamiento y alzamiento de estas calizas marinas que actualmente forman parte de los Alpes, y la excavación subsiguiente de profundos valles en el apilamiento sedimentario. La fotografía corresponde a los Schwaegalp con Saentis, en Suiza; el desnivel entre los extremos inferior y superior del funicular es de unos 600 metros.

Lámina 6. El Gran Cañón del Colorado, en Arizona, EE.UU. La sección geológica aflorante en el mismo y en las regiones cercanas representa casi la mitad de la historia de la Tierra. La garganta interior del río Colorado está excavada en sedimentos metamorfizados y en rocas volcánicas de unos 2.000 millones de años de antiguedad. Posteriormente, estas rocas se vieron involucradas en episodios orogénicos, y fueron intruidas por rocas ígneas en más de una ocasión. Encima de una disconformidad se hallan los sedimentos basculados de las Wedge Series o Series en Cuña, que datan del Precámbrico. Por encima de éstos hay otra gran disconformidad formada hace unos 600 millones de años y posteriormente fosilizada por rocas cámbricas. Esta disconformidad marca el inicio del gran desarrollo de la vida sobre la Tierra. El resto de la sección del Cañón, cuya continuación se halla en el norte de Utah, constituye un intermitente pero instructivo registro de la historia geológica de esta parte de América desde el Cámbrico hasta la actualidad; en él hay evidencias de numerosas transgresiones marinas y de muchos cambios ambientales dramáticos, desde desiertos transformados en selvas tropicales húmedas y desde lagos de agua dulce reemplazados por volcanes. ▶





Lámina 7. Estratos plegados en las cercanías de Kandersteg, en los Alpes berneses, Suiza. La formación de montañas conlleva la deformación, la metamorfización y el alzamiento de las rocas preexistentes para constituir nuevas tierras muy por encima del nivel del mar; la erosión empieza a atacar las montañas en el instante mismo de su formación



Lámina 8. Ruinas del City Hall, San Francisco, EE.UU., después del terremoto del 18 de abril de 1906.

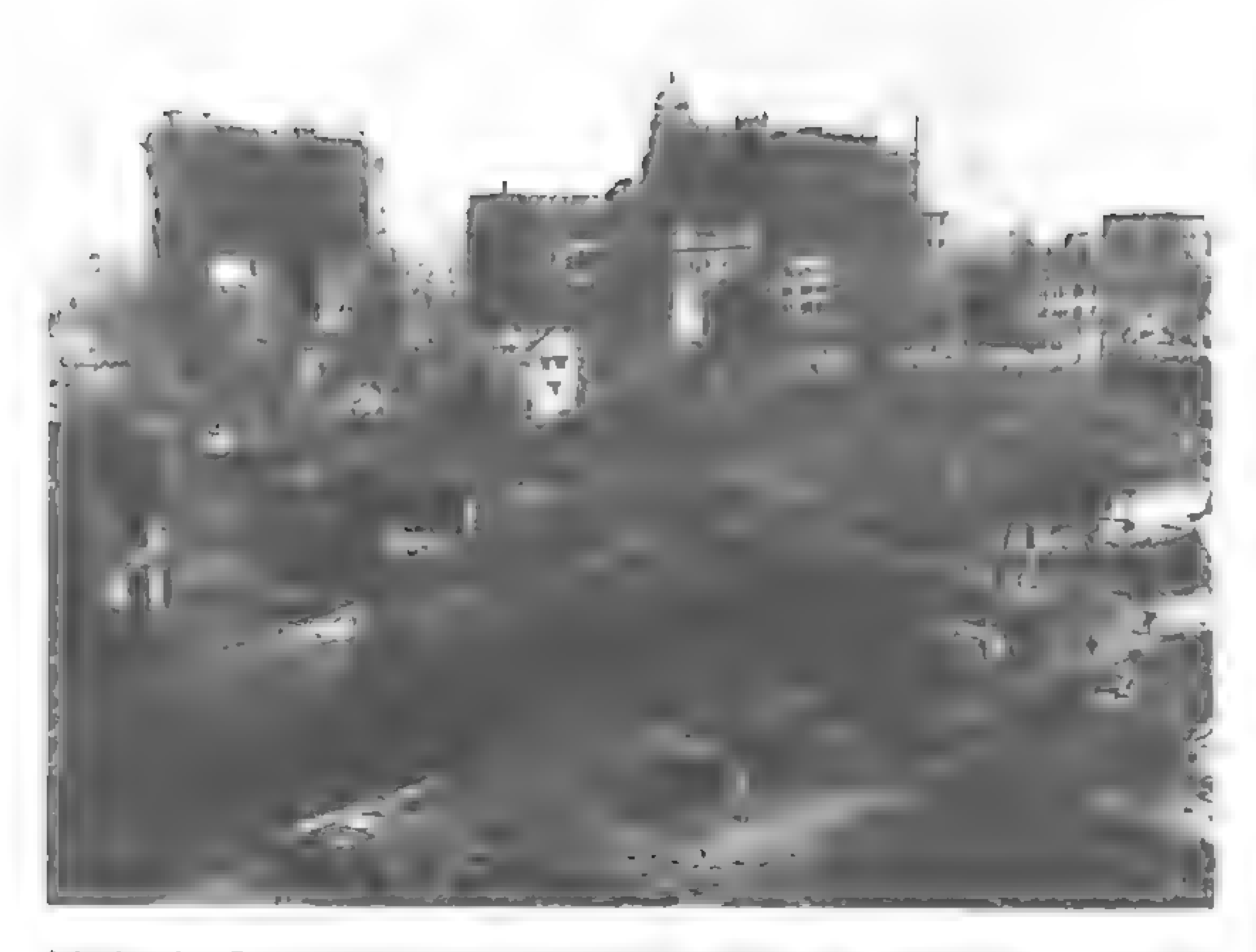


Lámina 9. Ruinas de Nihombushi, Tokio, Japón, después del gran terremoto del año 1923, en el que perecieron 143.000 personas.

Lámina 11. Un expresivo dibujo publicado en el *Illustrated London News* de ▶ 1867 muestra el vapor de la marina real *La Plata* luchando contra un tsunami de origen sísmico ocurrido en Santo Tomás, en el Caribe



Lámina 10. Ruinas de Mesina, Italia, después del terremoto del año 1908, en el que perecieron 160.000 personas.



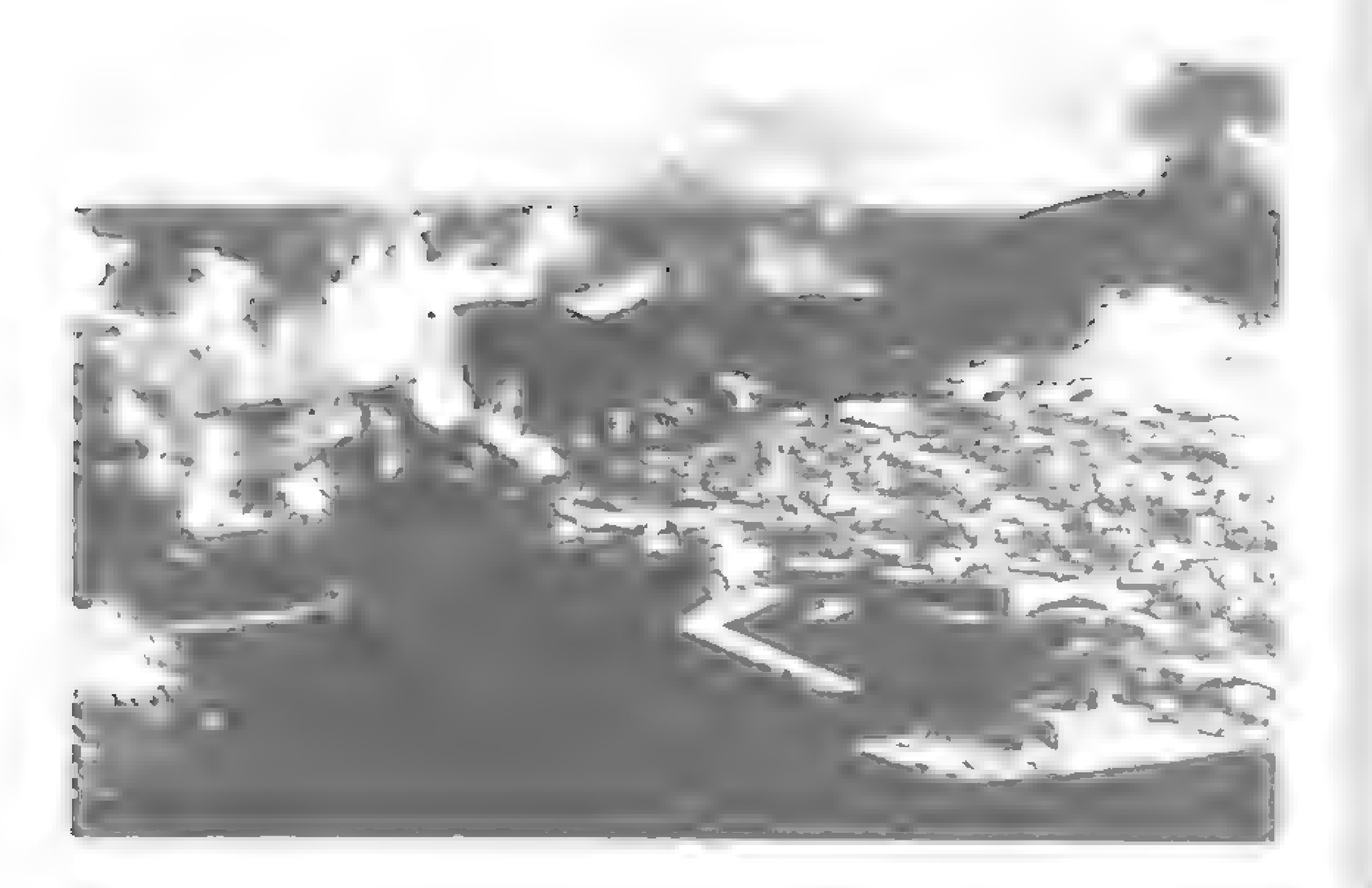


Lámina 12. En 1973, las coladas de lava procedentes de Eldjfell, la montaña de fuego, destruyeron totalmente el sector este de la ciudad de Vestmannaeyjar, en la isla de Heimaey, el puerto pesquero más importante de Islandia. La mayoría de edificios cercanos al volcán quedaron totalmente sepultados por las cenizas volcánicas, tal como sucedió en Pompeya 1894 años antes, el año 79 a.C.



Lámina 13. Las nubes ardientes que se vierten por la ladera del Mont Pelée pueden desplazarse a más de 160 kilómetros por hora e incineran y matan bajo su polvo destructivo todo lo que hallan a su paso. Una de estas nubes arrasó la cercana ciudad de St. Pierre, Martinica, el año 1902



Lámina 14. St. Pierre en sus días de esplendor: un próspero puerto al que a veces se le llamaba el pequeño París del Caribe; pero era una ciudad destinada a morir.

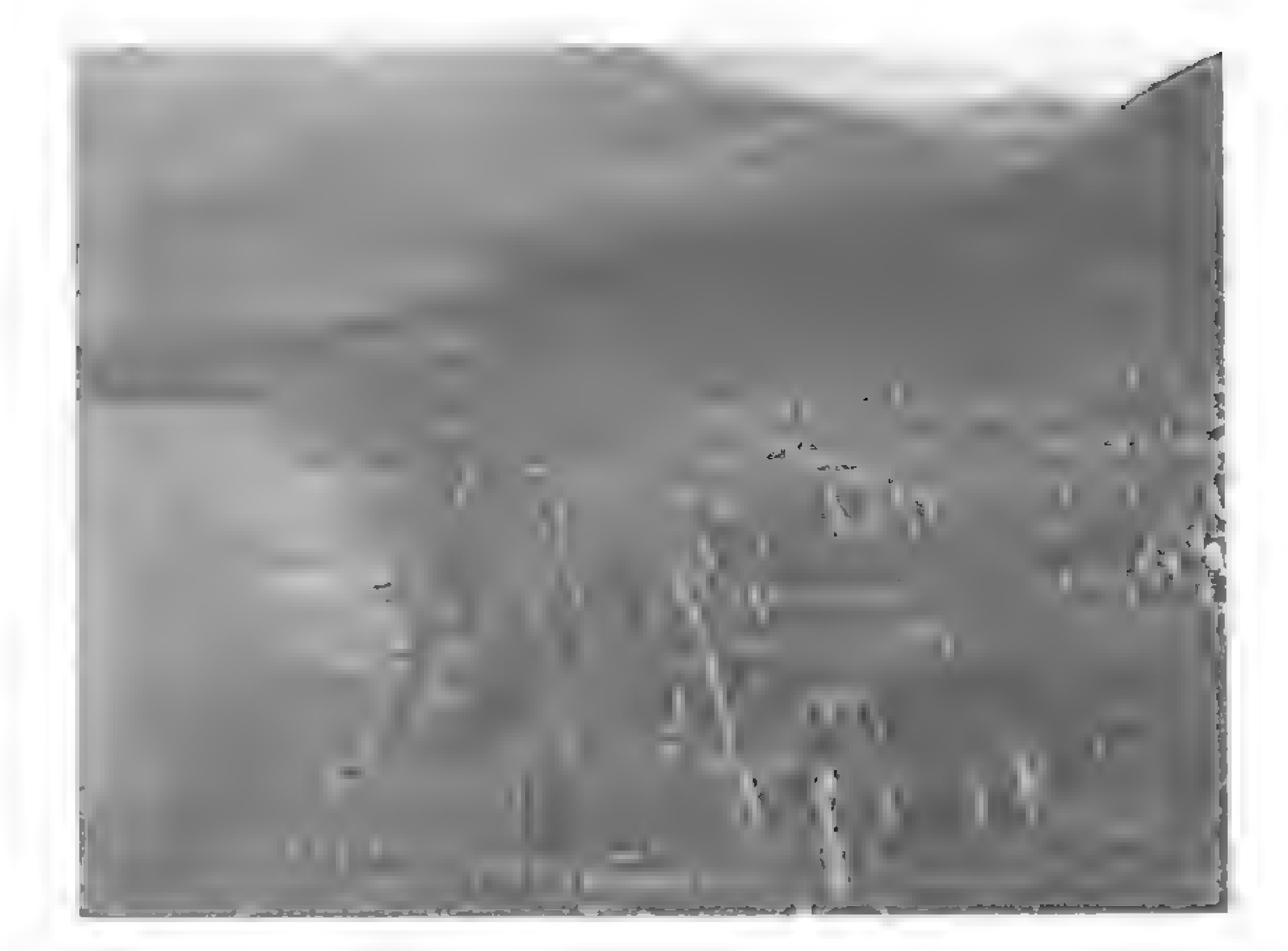


Lámina 15. St. Pierre después del desastre del año 1902. Los 28.000 habitantes de la ciudad, excepto dos, murieron en el holocausto. El panorama no es muy distinto de lo que resulta después de la explosión de una bomba atómica; la diferencia es que la erupción fue casi 1.000 veces más poderosa.



Lámina 16. Víctima de la catástrofe del año 1902 en la Martinica, Pequeñas Antillas. Las nubes ardientes matan por asfixia, quemaduras y caídas de fragmentos procedentes de edificios. Aquí el calor repentino ha reventado el abdomen de la víctima, expulsando su contenido.

Lámina 17. En el terremoto del año 1923 en el Japón, muchas de las 143.000 víctimas murieron a raíz de calamidades subsiguientes a los principales temblores de tierra. Tan sólo en este lugar de Honjo, Tokio, perecieron abrasadas 35.000 personas.



Lámina 18. Molde de escayola de un habitante de Pompeya que no pudo escapar de la muerte durante la erupción del Vesubio, en el año 79 a.C. Después de ser enterrado por las cenizas volcánicas, el cuerpo se descompone dejando en su lugar una cavidad hueca. Los arqueólogos rellenan estas cavidades con escayola con el fin de obtener los moldes



Lámina 19. Los animales atados no pudieron escapar a la lluvia de cenizas y a las nubes ardientes que se abatieron sobre Pompeya. Este perro, al igual que el hombre de la ilustración precedente, murió probablemente por asfixia.





Lámina 20. El retorno de una nueva edad de hielo haría que escenas como la de la fotografía fuesen comunes a lo largo de todo el año. Los veranos serían tan cortos que la nieve caída durante el invierno no llegaría a derretirse por completo; de esta manera las latitudes septentrionales irían quedando progresivamente cubiertas por una capa de hielo y nieve cada vez más espesa.

Lámina 21. La fusión de los casquetes polares conllevaría la inundación de todas las tierras bajas del mundo. La fotografía, que corresponde a las inundaciones del año 1977 en Lyon, Francia, da una cierta idea de las consecuencias de una inundación a gran escala

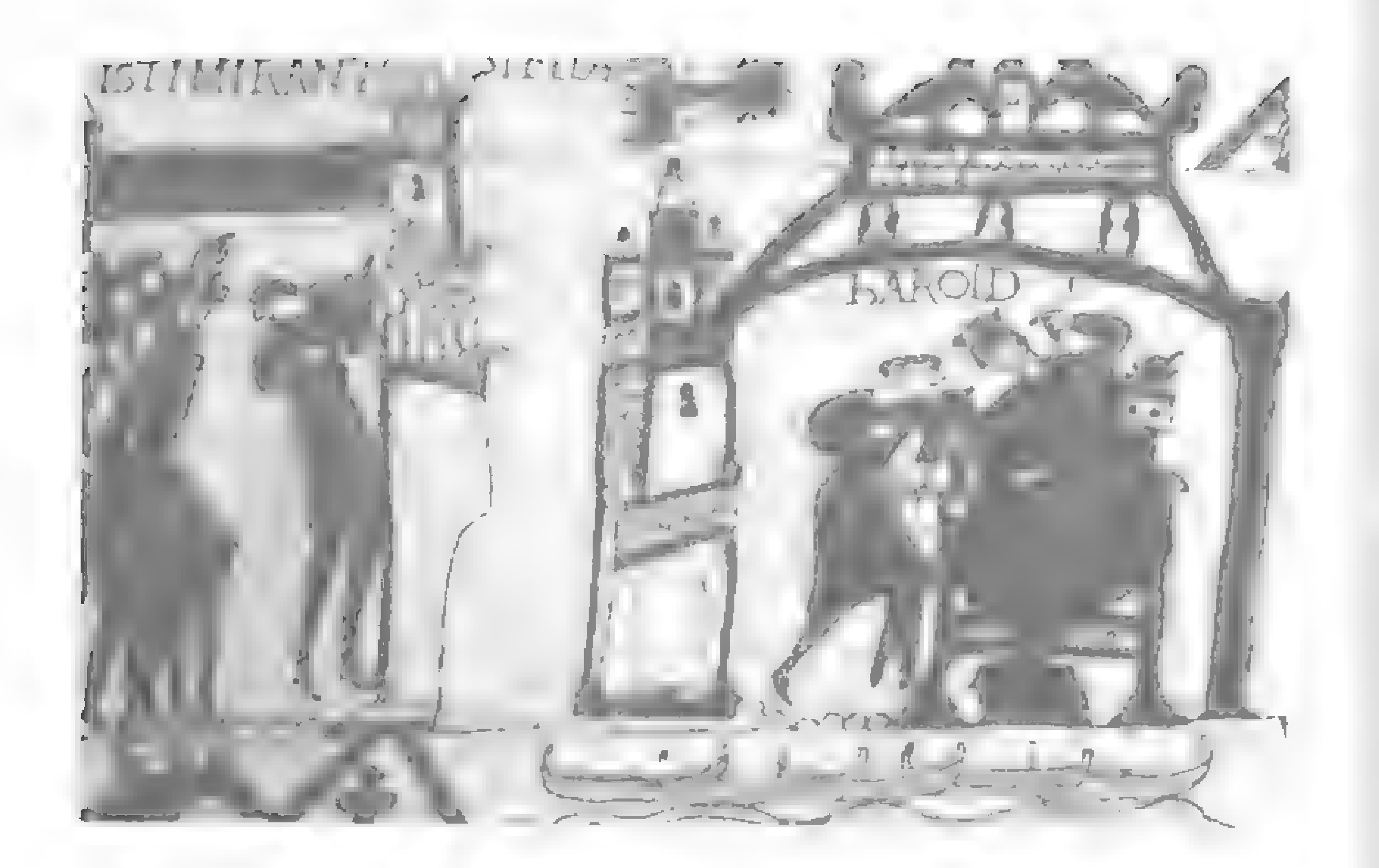


Lámina 22. El cometa Halley fue claramente visible en los cielos de Inglaterra el mes de febrero del año 1066. El Tapiz de Bayeux muestra a un astrologo explicando al rey Harold que el cometa es un signo de mal agüero.

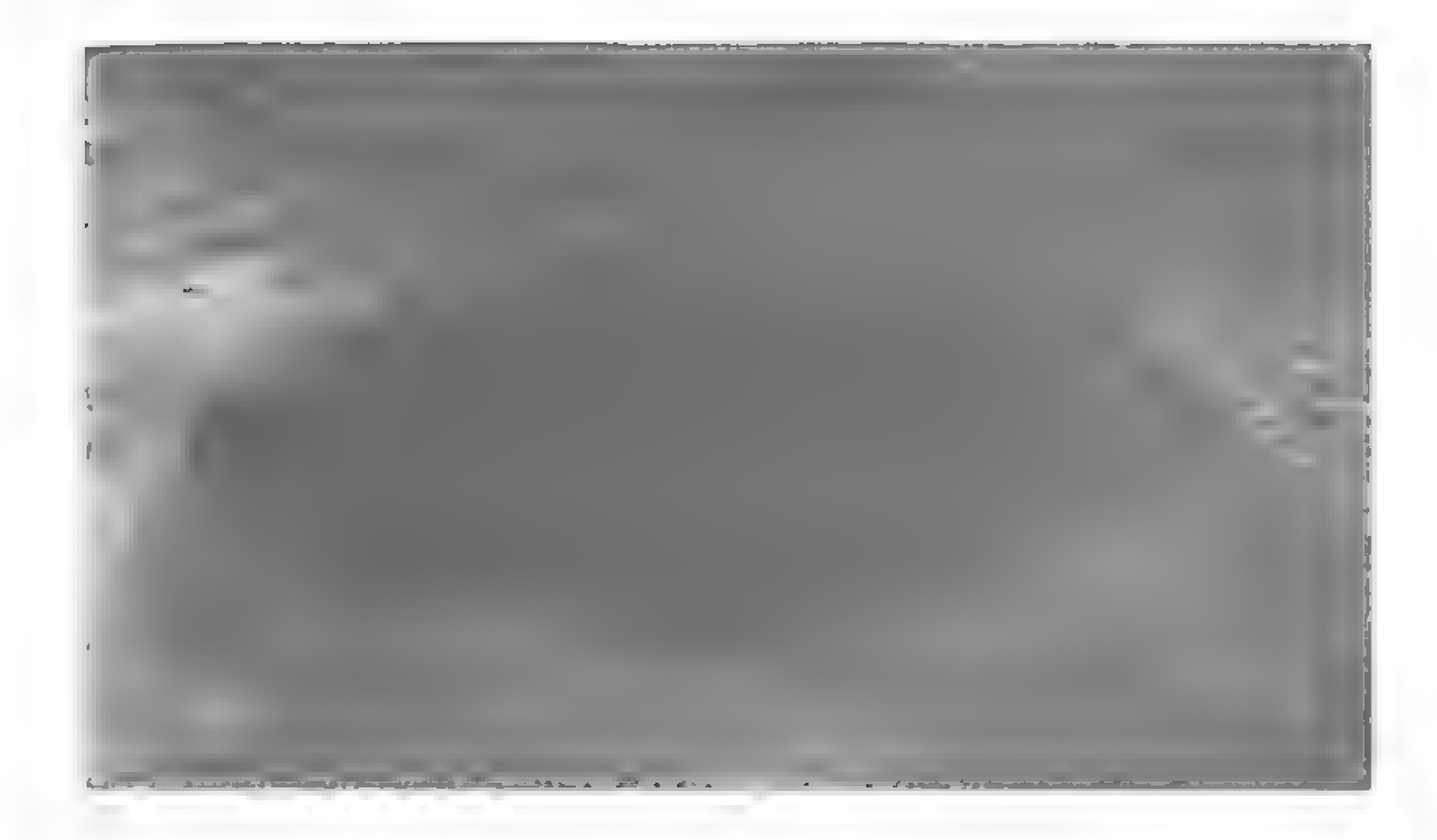


Lámina 23. El cráter Barringer (o Meteor), en Arizona, EE.UU. Es una gran depresión circular de 1.200 metros de diámetro y algo más de 180 metros de profundidad que fue formada, hace unos 25.000 años, por el impacto de un meteorito procedente del espacio al chocar contra la Tierra a gran velocidad.

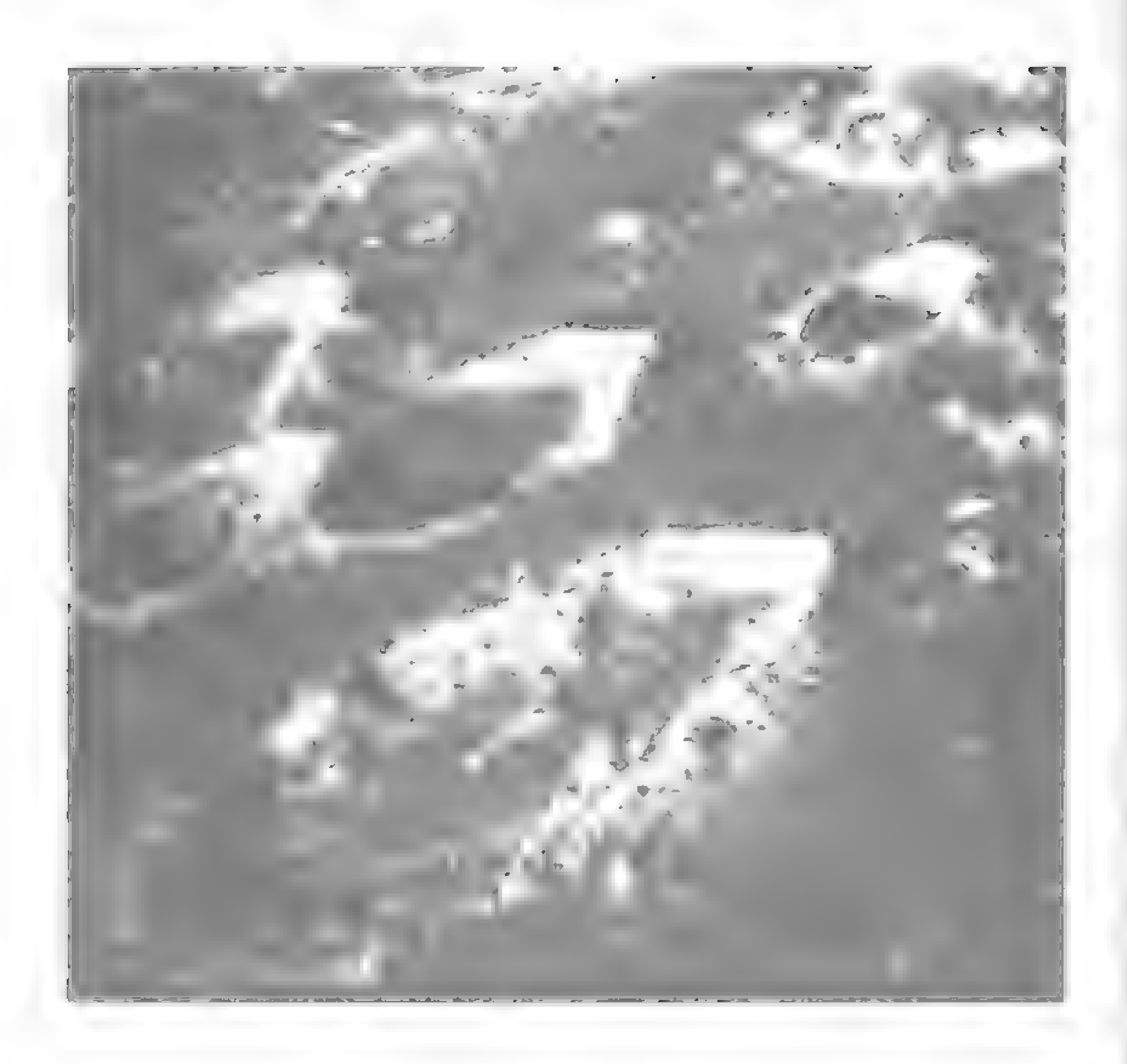


Lámina 24. Cuatro grandes cráteres de impacto en la Luna. El mayor es Goclenius, de 75 kilómetros de diámetro y 1.860 metros de profundidad. Cruzado por una notable acanaladura lunar, está situado al borde del Mar de la Fecundidad. Detrás de Goclenius se hallan, de izquierda a derecha, Magelhaens A (32 kilómetros de diametro y 1.740 metros de profundidad), Magelhaens (38 kilometros de diámetro y 1.960 metros de profundidad) y Gutenburg D (19 kilometros de diámetro y 1.260 metros de profundidad). Detrás de estos tres cráteres alineados están Colombo A (43 kilómetros de diámetro y 1.820 metros de profundidad) y el borde del Mare Nectaris. Los dos pequeños cráteres situados a la derecha de Colombo A son Colombo G y Colombo H, de 11 y 6 kilómetros de diámetro respectivamente.

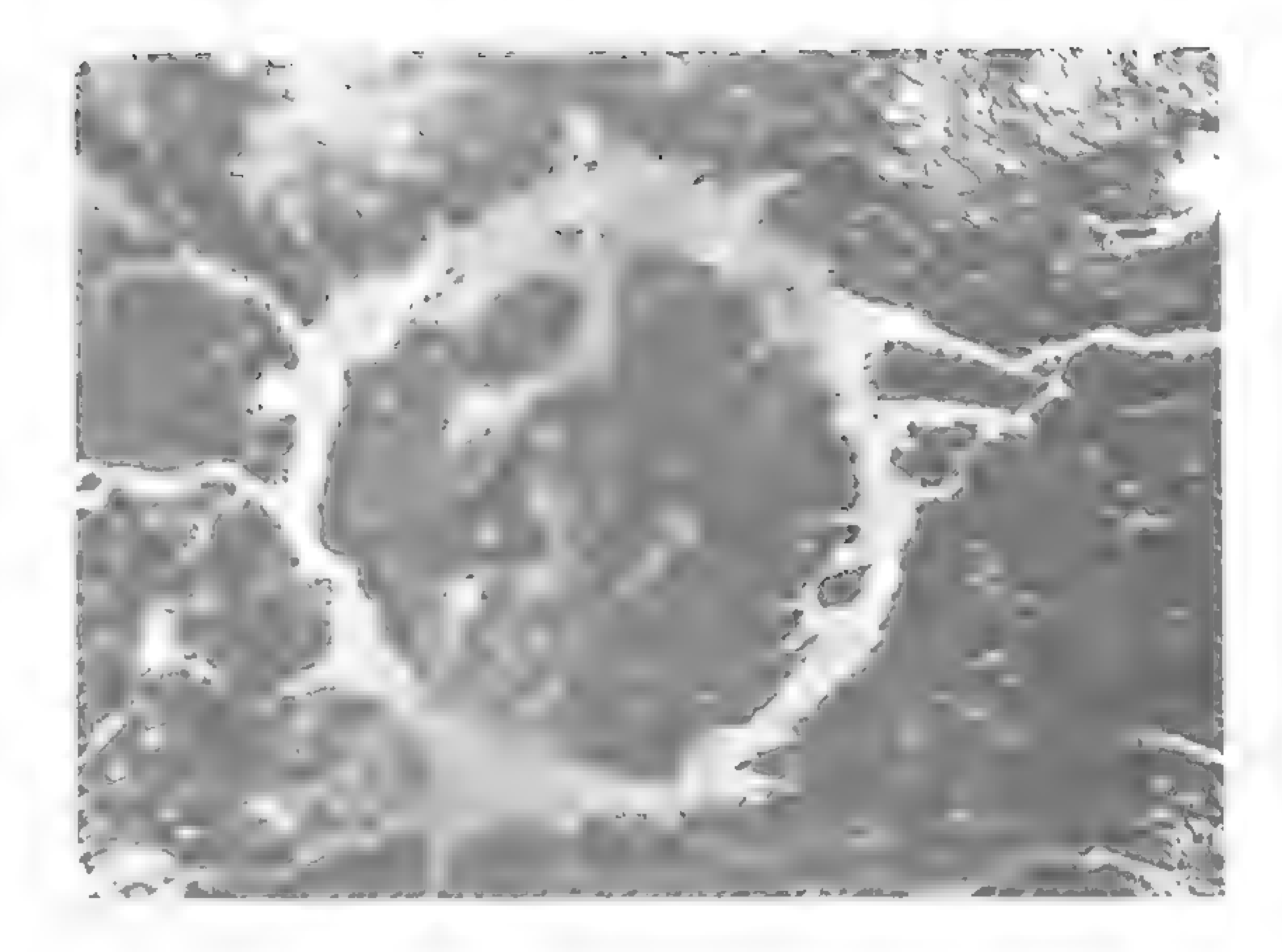
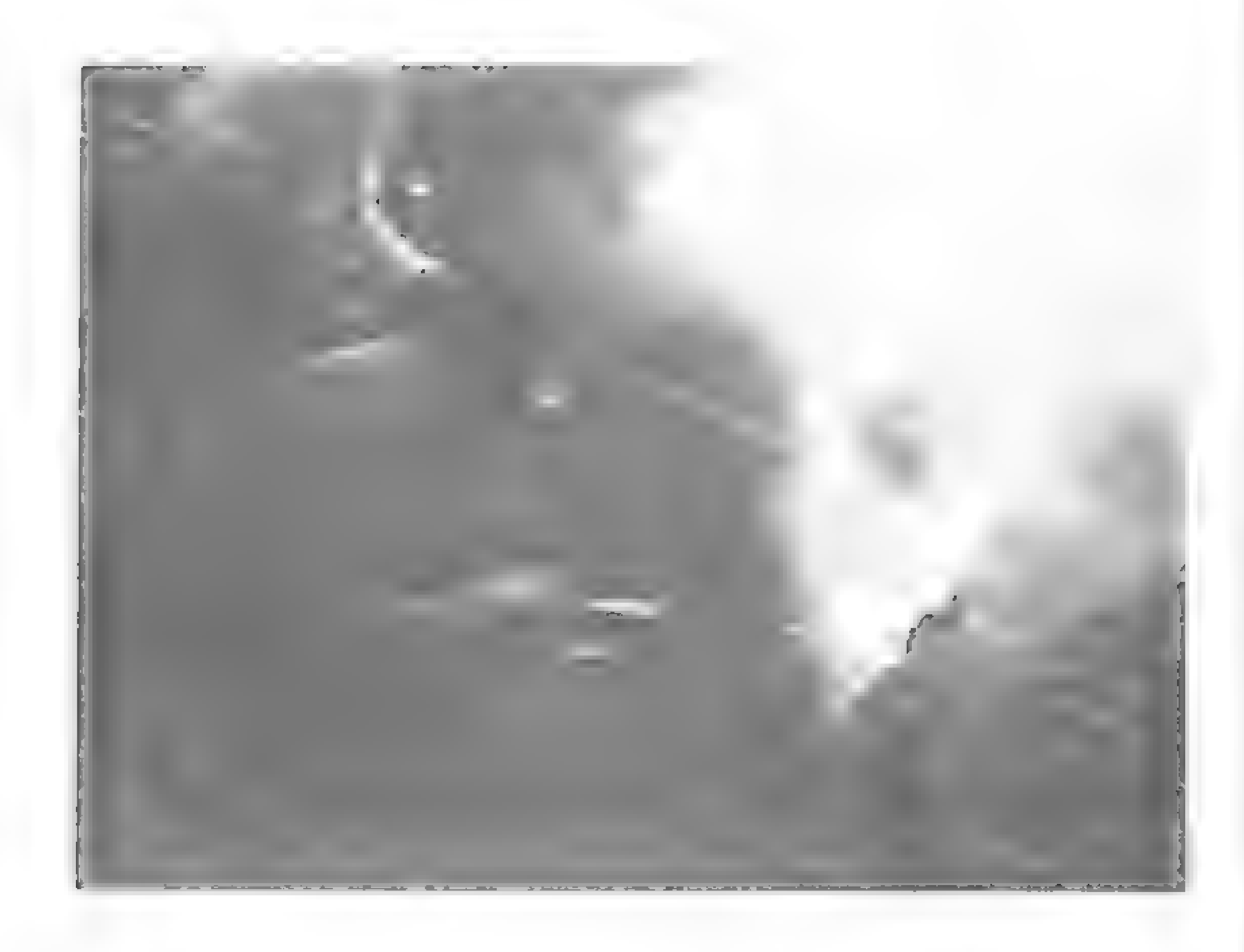


Lámina 25. El lago Manicougan, al nordeste del Quebec, Canadá, es un astroblema de 59 kilómetros de diámetro. Los astroblemas son las cicatrices dejadas sobre la superficie de la Tierra por las colisiones entre nuestro planeta y pequeños cuerpos astronómicos que se desplazan a gran velocidad por el espacio.



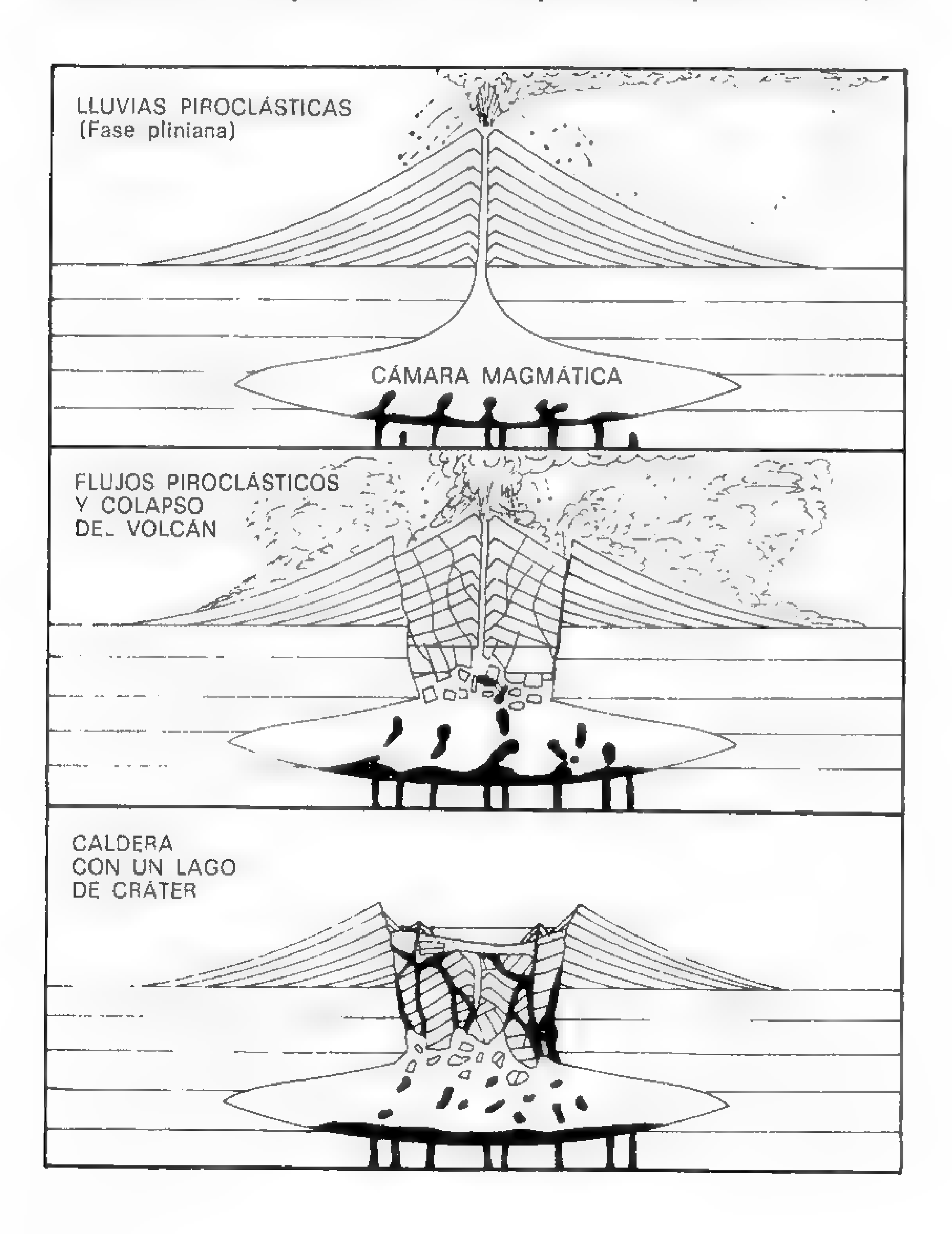
Lamina 26. Cientificos tomando muestras de gases en los flancos de un volcan en erupcion. El analisis de estos gases proporciona valiosa informacion acerca del estado de la erupcion volcanica y podria ser de gran utilidad, combinado con mediciones geofisicas, en la prediccion de fases eruptivas peligrosas.

restaba de la isla principal era un acantilado arqueado constituido por una parte del cono del Rakata. Danan y Perboewetan también habían desaparecido; en su lugar se había abierto un enorme cráter submarino de 6 kilómetros de diámetro y 277 metros de profundidad que estaba conectado con un segundo cráter de 5 kilómetros de diámetro y 122 metros de profundidad.

La isla de Krakatoa había dejado de existir, pero ¿cómo había sucedido? Una de las hipótesis más extendidas era la de que sencillamente se había ido rompiendo en pedazos; pero la investigación detallada de antiguos registros y de la composición y el volumen de los fragmentos volcánicos acumulados en las otras islas de la zona a raíz de la explosión revelaron que ello no había sido así. La cantidad de fragmentos sólidos procedentes de las islas del antiguo archipiélago de Krakatoa no constituía más del 5 por ciento del total de los depósitos. Una vez calculado el volumen total mínimo escupido por los volcanes, y convertido en el volumen equivalente de rocas densas (esto constituye una técnica muy empleada en vulcanología cuando se quieren establecer las relaciones entre las cantidades de material piroclástico expulsadas por los volcanes —polvo, cenizas, piedra pómez, bombas— y las subsidencias causadas por las erupciones), se vio que la cantidad de materiales procedentes de las antiguas islas (40.000.000.000 de metros cúbicos aproximadamente) apenas si bastaría para llenar los cráteres submarinos creados por la erupción. Esto significa que fue la zona situada debajo de los volcanes la que fue proyectada a lo lejos durante la erupción; en otras, la erupción había dado lugar a la evacuación casi absoluta de una cámara magmática subterránea que estaba llena de lava incandescente. La gran rapidez con que esta cámara fue evacuada durante el clímax de la explosión hizo que la superestructura de las islas colapsase al desaparecer el soporte de la misma. La gravedad hizo el resto; el volcán se fue hundiendo por etapas hacia el interior de su propia cámara magmática casi vacía. Mientras esto ocurría, es muy probable que grandes cantidades de agua marina accediesen a las ardientes cavidades de la corteza (en algunas de las cuales aún debía haber magma); la conversión prácticamente instantánea del agua de mar en vapor sobrecalentado provocó, casi con absoluta certeza, algunas de las grandes explosiones que caracterizaron a la erupción. Muchos de los tsunamis también pueden ser correlacionados con estos acontecimientos. Después de la erupción, la zona continuó sumergiéndose durante algunos años más; este hundimiento es debido a la compactación y amoldamiento progresivo de los materiales que quedaron en los grandes cráteres, llamados propiamente *calderas*.

Las altas corrientes atmosféricas transportaban hacia el oeste las finas partículas de polvo expulsadas durante la erupción. Dos días más tarde, la

nube de polvo ya había alcanzado África y quince días más tarde ya había dado la vuelta al mundo. La calima atmosférica provocada por la nube de polvo se extendió desde los trópicos hacia el norte y el sur, llegando a Islandia el día 30 de noviembre. Esta calima fue la responsable de un gran número de efectos ópticos, tales como impresionantes puestas de Sol, coloraciones anómalas del Sol y la Luna, y formación de coronas o halos. ¡En todo el mundo pudieron verse lunas y soles verdes, azules y rosados! Más impresionante fue cuando los científicos europeos se dieron cuenta de que la radiación solar que llega al suelo disminuyó en un 20 por ciento cuando la capa de polvo volcánico se situó sobre Europa. Durante meses la radiación solar estuvo situada un 10 por ciento por debajo de sus valores normales. En total tuvieron que transcurrir más de tres años para que la atmósfera mundial quedase limpia de las partículas de fino polvo expulsadas por la erupción de Krakatoa.



La erupción de Krakatoa del año 1883 causó una profunda impresión en los científicos de la época victoriana. Era la mayor manifestación de energía volcánica de que nunca se había oído hablar anteriormente. La energía liberada durante las explosiones atómicas de los últimos años es muchísimo más pequeña en comparación con las ingentes cantidades de energía volcánica liberadas en 1883; asimismo, tampoco se tenía noticia de que ningún tsunami anterior hubiese causado tantas muertes.

Sin embargo, incluso la mismísima erupción de Krakatoa es insignificante en comparación con algunos de los grandes cataclismos volcánicos

◀ **Fig. 22.** Formación de una caldera: el diagrama superior muestra la primera fase en la formación de una caldera. Durante la fase pliniana de una erupción, se producen violentas explosiones que provocan la expulsión de ingentes cantidades de piroclastos; a raíz de la caida de los mismos, los alrededores del volcán quedan cubiertos por una capa de cenizas. Los fragmentos más grandes y pesados no se ven afectados por la circulación atmosférica y siguen trayectorias balísticas que les hacen caer relativamente cerca del cráter. Debajo del volcán existe una gran cámara magmática que está lo bastante llena de magma para impedir que los diques basálticos (trazos gruesos oscuros) alcancen la superficie. Además, las fuentes basálticas suministran energía al magma en forma de calor y, después de cada erupción, contribuyen a la recarga de este gran reservorio.

Cuando, en el curso de un episodio eruptivo, la presión de los gases disminuye bruscamente, la columna eruptiva puede colapsarse cayendo masivamente. Sin embargo, lo más probable es que las bajas presiones de gases den lugar a la formación de una masa de lava espumeante que ulteriormente se convertirá en una densa nube de partículas fluidificadas calentadas al rojo. Tanto uno como otro procesos conducirán a la formación de un flujo piroclástico. A menudo, este estadio coincide con la fracturación y hundimiento progresivo de la superestructura del volcán, que irá hundiéndose hacia la cámara magmática ya parcialmente evacuada.

En el diagrama inferior, el colapso o hundimiento es total. El calor volcánico y la energía de los gases se han disipado y la cámara magmática empieza a recargarse lentamente al tiempo que va absorbiendo al cono hundido. La depresión circular que queda en superficie recibe el nombre de caldera, y en su interior puede haber un lago o uno o varios conos de post-colapso.

del pasado, cuyas evidencias están contenidas en el registro de las rocas que se han ido formando a lo largo de la vida de la Tierra. Por ejemplo, sabemos que en el último millón de años grandes flujos piroclásticos incandescentes, algunos de más de 30 metros de espesor, cubrieron la región central de la isla Norte de Nueva Zelanda desplazándose a velocidades de hasta 100 kilómetros por hora; a su paso, todo tipo de materia orgánica quedaba vaporizada. Se sabe asimismo que grandes coladas basálticas se desparramaron por los territorios de los estados de Washington, Oregón e Idaho hace algunos millones de años; parte de esas lavas quedaron retenidas en pozos de lava fundida de 200 kilómetros de largo y 80 kilómetros de ancho; la temperatura interna de estos pozos superaba los 1.000 °C y el grosor de lava en ellos acumulada puede exceder 120 metros. Por otra parte, se sabe que ya en los tiempos históricos, cerca del año 1470 a.C., la isla de Santorín, en el Mediterráneo oriental, quedó parcialmente destruida como resultado de una erupción volcánica extremadamente violenta, parecida en muchos aspectos a la de Krakatoa; en Santorín también se originaron grandes tsunamis que devastaron las costas de las islas y tierras adyacentes, provocando posiblemente el fin de la civilización minoense y dando lugar a la leyenda de la Atlántida. Según la opinión de los arqueólogos e historiadores, posiblemente la erupción de Santorín causó muchas más víctimas que la de Krakatoa; el único inconveniente para aceptar plenamente este punto de vista es que, obviamente, no hay informaciones directas acerca de las consecuencias de la erupción de Santorín que puedan ser consultadas hoy en día.

No es, por tanto, sorprendente que las historias de volcanes estén firmemente arraigadas en las leyendas y en la mitología. Cuando Homero escribió que el cíclope Polifemo lanzaba proyectiles encendidos a Ulises se estaba refiriendo, sin ninguna duda, al volcán Etna, en Sicilia. Para los romanos, los volcanes constituían la vivienda de Vulcano, en la que este dios forjaba los rayos de Júpiter y las flechas de Cupido cuando se hallaba en los aposentos subterráneos de los Cíclopes. Hoy en día, los geólogos contemplan las erupciones volcánicas de una forma muy diferente, considerándolas como auténticos laboratorios naturales en los que es posible estudiar las fuerzas de la naturaleza hasta sus últimas consecuencias. No cabe duda de que los contemporáneos de Homero sentían miedo frente a las erupciones volcánicas. Y no era para menos: el retumbar y los ruidos constantes que procedían de las entrañas de la tierra, las ensordecedoras explosiones incesantes, el estallido de proyectiles incandescentes, lluvias de polvo y cenizas acompañaban el lento pero inexorable avance de las negras lenguas sinuosas de lava ardiente. Diodoro Siculus explica que, durante su campaña contra Siracusa en el año 396 a.C., el ejército cartaginés se vio obligado a

retroceder a causa de una erupción del Monte Etna. No hay duda de que los hombres de la antigüedad miraban a los volcanes con superstición y temor, considerándolos dioses o, cuando menos, la morada de los dioses.

Sin embargo, antes de adentrarnos en el estudio de las interrelaciones entre los volcanes y el hombre, de los diferentes tipos de riesgos volcánicos y de las posibilidades de predecir las erupciones, es necesario que sepamos qué son los volcanes, dónde se encuentran y por qué, y cuáles son los diferentes productos y estilos de la actividad volcánica.

Cuando se habla de un volcán, la imagen que suele venir a la mente de las personas es la de una montaña cónica de cuya cima salen llamas y humo. En general, esta imagen se ajusta a la realidad, aunque es necesario formular algunas reservas; no todos los volcanes tienen un cono simétrico; no todos escupen fuego, y el humo que sale de ellos es en realidad cenizas y polvo constituidas por finísimas partículas de rocas y lava pulverizadas. Tal vez la mejor manera de describir un volcán es diciendo que se trata de una abertura en la Tierra de la que salen gases o lava, pero generalmente ambos a la vez. Esta definición incluye tanto a las grandes grietas que expulsan cenizas y lava como a los típicos volcanes en forma de cono, como el Monte Fuji, en el Japón, y el Mayon, en Filipinas. Un cono volcánico es sencillamente una acumulación de materiales piroclásticos procedentes del cráter y que se apilan alrededor del mismo con tendencia a crecer hacia arriba si la erupción continúa; estos conos pueden alcanzar los 4.000 metros de altura. Los volcanes no están en erupción permanente, sino que tienen períodos de calma o inactividad. Cuando las probabilidades de que un volcán dado entre algún día en actividad son muy altas se dice que ese volcán está *vivo;* volcanes *activos* son los que están en erupción; por último, los volcanes *dormidos* son los que están en calma. Sin embargo, para determinar si un volcán está vivo o no, deben tenerse en cuenta muchos elementos. Antes se decía que un volcán era activo si había estado en erupción durante los tiempos históricos, independientemente de si estaba o no en erupción en la actualidad. Si no estaba en erupción, se decía que estaba dormido; los volcanes que no habían entrado en erupción durante los tiempos históricos eran calificados de *extintos.* El Vesubio era uno de esos volcanes: en tiempos de los romanos se creía que era un volcán extinto; sin embargo, el año 79 entró bruscamente en erupción. También se creía que el Mont Pelée, en la caribeña isla de la Martinica, era un volcán extinto, pero, tal y como ya hemos visto, el día 8 de mayo de 1902 entró violentamente en erupción. Nadie pensaba que el Monte Lamington, en Papuasia-Nueva Guinea, fuese siquiera un volcán, y mucho menos un volcán asesino que mató a 2.942 personas en 1951. La ciudad de Higaturu fue destruida y

todos sus habitantes perecieron abrasados por los gases ardientes; la misma erupción arrasó una área de 230 kilómetros cuadrados de densa selva ecuatorial. La actividad espasmódica del Monte Lamington se prolongó hasta el año 1955.

Es evidente que el concepto "tiempos históricos" no abarca un lapso de tiempo lo bastante largo como para determinar si un volcán está o no extinto. Unos 160 kilómetros al norte de Roma está situado el antiguo volcán Vulsino, cuyo cráter está actualmente ocupado por el pintoresco Lago Bolsena. Éste, junto con otros volcanes cercanos, depositaron en la prehistoria grandes volúmenes de rocas volcánicas; la propia ciudad de Roma se asienta sobre esos materiales, mudos testigos de antiquísimos holocaustos. Estas erupciones prehistóricas ocurrieron probablemente hace unos 5.000 ó 10.000 años, o quizás un poco más, por lo que existe una posibilidad cierta de que en el futuro la región de Roma vuelva a ser invadida por el vulcanismo. Trabajos recientes efectuados por los vulcanólogos han demostrado que algunos volcanes que no han entrado en erupción a lo largo de los últimos 2.000 años no pueden ser considerados extintos. Muchos están indudablemente vivos, y deben ser considerados asesinos potenciales. Un volcán sólo puede ser calificado de extinto o *muerto* cuando puede afirmarse científicamente que hay pocas o ninguna posibilidad de que entre en erupción. Este tipo de volcanes suelen ser muy antiguos y suelen estar profundamente disecados por la erosión; a veces, incluso llegan a aflorar las rocas de la antigua cámara magmática.

El tipo de erupción de un volcán dado está relacionado con el tipo de rocas que produce. A grandes rasgos, hay dos grandes grupos de rocas volcánicas: *máficas* y *sálicas*. Las rocas máficas son muy densas y tienen colores oscuros; sus lavas son oquerosas, lo que permite que los gases escapen fácilmente, evitando así que la presión de los mismos alcance niveles peligrosos. Químicamente, las rocas máficas son ricas en magnesio, hierro, sodio y calcio, y pobres en sílice, potasio y aluminio. Por su parte, las rocas sálicas son pobres en magnesio, hierro y calcio y, en cambio, son ricas en sílice, potasio y aluminio. Además, los magmas sálicos son rígidos y espesos como la pez y los gases no pueden escapar fácilmente. Por este motivo, en los volcanes sálicos pueden alcanzarse presiones de gas peligrosamente altas, por lo que este tipo de vulcanismo suele estar asociado con violentas explosiones. En marcado contraste con las rocas máficas, las sálicas son menos densas y de colores claros; esta diferencia de densidades constituye la pieza clave para comprender el vulcanismo.

En profundidad las rocas tienen propiedades físicas "conflictivas". Están sometidas a grandes presiones, pero son lo suficientemente plásticas como para admitir lentos movimientos circulatorios bajo la influencia del

calor procedente de las desintegraciones radiactivas que tienen lugar incesantemente en las entrañas de la Tierra. Las rocas sobrecalentadas se expanden y se vuelven más ligeras y, por tanto, tienden a ascender lentamente a través de las rocas circundantes más frías. Las rocas también son lo suficientemente elásticas como para transmitir los temblores de tierra, tal y como vimos en el capítulo 4; pero, al mismo tiempo, son lo bastante rígidas como para romperse y desplazarse bruscamente las unas respecto a las otras a lo largo de los planos de falla durante los terremotos; también, durante las erupciones volcánicas, y convertidas en magma, pueden ser lanzadas hacia el espacio en forma de gotas o masas más o menos líquidas que al enfriarse caerán al suelo convertidas en fragmentos de piedra pómez. Por tanto, en profundidad las rocas ígneas parecen tener propiedades que son inherentes a una composición extraña llamada masilla de silicona: son frágiles, dúctiles, elásticas y fluidas.

Ya hemos visto que la Tierra está constituida por una serie de envolturas de diferentes densidades y composiciones, y que el calor radiactivo es el responsable de la formación de corrientes de convección y movimientos ascendentes en el manto terrestre. También sabemos, gracias a los estudios sísmicos, que en nuestro planeta existen varias zonas sísmicas bien definidas y que la epidermis de la Tierra, que tiene unos 50 kilómetros de espesor en promedio, está fragmentada en seis grandes placas y muchas otras menores, como si fuese la cáscara de un huevo roto. En los ejes expansivos o dorsales medio-oceánicas se forma nueva corteza oceánica. Dichas dorsales están a menudo dislocadas en escalón por las fallas transformantes que surgen en respuesta a las diferentes tasas de expansión existentes de un lugar a otro. Ese crecimiento de la superficie de la corteza exterior de la Tierra, debido a la expansión de los fondos oceánicos, está compensado por los procesos de subducción que se producen en los arcos insulares y en los márgenes continentales en que una placa oceánica se va hundiendo progresivamente debajo de la placa continental con la que está colisionando; la subducción determina la aparición de un plano inclinado sísmicamente activo denominado zona de Benioff. El vulcanismo submarino de las dorsales medio-oceánicas y de las grandes profundidades oceánicas despide grandes volúmenes de lava en el fondo marino; sin embargo, este tipo de actividad es aún prácticamente desconocido. Los volcanes surgen en tres situaciones estructurales, bastante diferentes entre sí: a lo largo de las crestas de los bordes de placa constructivos, como, por ejemplo, en las dorsales medio-oceánicas del Atlántico y del Pacífico Este; a lo largo de los destructivos bordes de placa que limitan algunas placas continentales, tales como la Cordillera Andina en el continente sudamericano y los arcos insulares del Pacífico Oeste; y en el centro de ambas placas corticales, tanto

oceánicas como continentales, en que se hallan situados encima de puntos calientes o ascensos del manto más o menos fijos. Las islas Hawaii, por ejemplo, están situadas en medio de la placa del Pacífico, y los volcanes del Valle del Rift del África oriental están dentro de la placa africana. Por tanto, los volcanes no están distribuidos al azar: están ubicados en zonas en donde se dan unas determinadas condiciones estructurales, las cuales a su vez dependen de la distribución y la naturaleza de lo que los geólogos llaman los bordes de placas.

En medio del océano Atlántico existe una cadena de montañas y valles de rift. Los puntos culminantes de esta cadena, en la cual, por otra parte, se han podido efectuar muy pocas observaciones directas debajo del agua, sobresalen por encima del nivel del mar solamente en los lugares donde la actividad volcánica ha sido suficiente para ello. En el extremo norte de la dorsal sobresale la isla de Jan Mayen, situada 1.500 kilómetros al noreste de Islandia; en la misma, y en medio de la desolación ártica, se eleva el volcán Beerenberg, de 2.275 metros de altura, cuya última erupción se produjo en 1970-71. Islandia, la tierra de fuego y hielo donde se hallan los famosos géiseres, se apoya sobre la dorsal medio-atlántica; la isla debe su existencia a la actividad volcánica, que se manifiesta en la actualidad a través de los 22 volcanes aún activos que hay en su territorio. La prácticamente incesante llegada de nuevas masas de magma procedente del manto a los niveles más superficiales de la corteza hace que la isla siga creciendo en la actualidad. Cada vez que el magma rellena una fisura, las rocas situadas a ambos lados de la misma se desplazan lateralmente cediendo al empuje de los materiales recién llegados; cuando el magma se solidifica, el ligero ensanchamiento de la corteza queda preservado para siempre. Islandia se está pues desarrollando sobre un amplio segmento de la dorsal medio-atlántica de dirección noreste-sudoeste y en ella se hallan algunas de las rocas más jóvenes de la Tierra.

En Islandia se han producido algunas de las mayores erupciones volcánicas ocurridas en tiempos históricos. En 1783 una enorme colada de lava salió de una serie de fisuras de 24 kilómetros de largo que cruzaban el Laki Hill de noreste a sudoeste; en tan sólo cinco meses, cerca de doce kilómetros cúbicos de rocas recién formadas cubrieron una superficie de 560 kilómetros cuadrados. Esto, unido a las densas humaredas y lluvias de cenizas, provocó graves pérdidas tanto en el ganado como entre la población. Los daños causados a las cosechas, la muerte de 250.000 animales y los efectos de la erupción sobre las poblaciones piscícolas desembocaron en un período de hambre en el que murieron 10.000 personas (casi el 20 por ciento de la población islandesa de la época). Más recientemente, en la isla de Heimaey, al sur de Islandia, se formó un nuevo volcán: el Eldjfell. Durante los

cinco meses que duró su actividad cubrió parcialmente la ciudad pesquera de Vestmannaeyjar y casi bloqueó la entrada al puerto. La erupción empezó después de la medianoche del día 23 de enero de 1973, cuando se abrió una gran fisura de un kilómetro y medio de longitud orientada de norte a sur. Al cabo de 40 minutos ya se habían abierto 40 pequeños conos que expulsaban borboteantes masas de rocas fundidas a lo largo de la resplandeciente grieta mientras la lava se deslizaba colina abajo hasta alcanzar el mar. Afortunadamente, la flota pesquera estaba atracada en el muelle con los depósitos llenos de combustible y dispuesta a zarpar. En seis horas toda la población, compuesta por 5.300 personas, fue evacuada sin que nadie sufriese el menor daño. Heimaey es una de las islas del archipiélago de Westmann, como Surtsey, que se formó en 1963 a raíz de una erupción volcánica que duró hasta 1967.

Las siguientes islas volcánicas que emergen de la dorsal medio-atlántica están a 4.500 kilómetros al sur de Islandia: son las Islas Azores. En ellas se señaló la presencia de erupciones volcánicas submarinas los años 1865 y 1884, sin que los conos submarinos responsables de las mismas pudiesen ser localizados con precisión. Todas las islas del archipiélago de las Azores son de origen volcánico; el año 1963 hubo una erupción en el monte Pico, un perfecto cono volcánico de 2.365 metros de altura; en 1957, también el volcán Capelhinos entró en erupción. Las Islas Canarias están situadas 1.500 kilómetros al sudeste de las Azores y a tan sólo 100 kilómetros de las costas del desierto del Sahara. En ellas se produjeron erupciones los años 1902 y 1971. Más al sur, a 740 kilómetros de las costas de Senegal, se hallan las islas de Cabo Verde, donde está situado el volcán Fogo, que entró en erupción el año 1951. Aunque no estén directamente situadas sobre la dorsal medio-atlántica, hemos querido hablar de las Islas Canarias y de Cabo Verde porque, en primer lugar, nos permiten completar el mapa que muestra la distribución de los volcanes sobre la Tierra y, en segundo lugar, porque tienen grandes afinidades con los volcanes situados directamente sobre la dorsal. En las Azores, la dorsal medio-atlántica se curva hacia el oeste y después gira hacia el sudeste, discurriendo más o menos paralela a la costa africana. Sobre la misma se sitúan las diminutas islas de San Pedro y San Pablo, de Ascensión y de Santa Elena; la isla de Santa Elena es un pico volcánico que se alza desde una profundidad de 4 kilómetros hasta 816 metros por encima del nivel del mar. A mitad de camino entre la costa brasileña y la dorsal medio-atlántica hay otro pequeño grupo de islas volcánicas, Trinidad y Martín Vaz. Tristán da Cunha y sus vecinas Nightingale e Inaccesible están situadas unos centenares de kilómetros al norte del límite de los hielos flotantes de la Antártida. El año 1962 una erupción acabó con los intentos de colonizar Tristán, cuando la población

fue evacuada prematuramente a Inglaterra; 500 kilómetros más al sur está la isla de Gough, y a 2.400 kilómetros de distancia en dirección al sudeste se halla la isla de Bouvet, convertida en solitario centinela del extremo meridional de la dorsal medio-atlántica.

En esa zona, la dorsal gira hacia el este y doblando el Cabo de Buena Esperanza se adentra en el océano Índico, en donde toma el nombre de dorsal atlántico-índica. La dorsal pasa entre las islas del Príncipe Eduardo y de Corzet y, a 2.000 kilómetros al este de Madagascar, vira hacia el norte, en las proximidades del volcán del Piton de la Fournaise, en las Islas Reunión; la dorsal medio-índica prosigue hacia el sudeste. La prolongación septentrional se convierte en la dorsal de Carlsberg y a través del Golfo de Adén penetra en el Mar Rojo, en donde se convierte en el famoso eje expansivo que está separando lentamente Arabia de África. Al norte del Mar Rojo, y en parte como continuación del mismo, se halla el rift del Mar Muerto (el lugar más profundo respecto al nivel del mar situado en el interior de un continente), que por el norte llega hasta Siria, en donde se pierde definitivamente. Al sur del Mar Rojo, en Etiopía, otro ramal sigue los grandes valles de rift del este de África, en donde se hallan los famosos volcanes Kilimanjaro, Monte Kenia, Lengai, Logonot y Nyiragongo, cuya prolongación es el volcán Karthala, en las Comores.

La dorsal medio-índica se dirige hacia el sudeste hasta la isla volcánica de San Pablo (St. Paul); a continuación, prosigue en dirección al sudeste no sin antes haber descrito un par de curvas a su paso por el sur de las costas australianas; en esta zona del océano Índico recibe el nombre de dorsal del sudeste del océano Índico; la misma discurre a lo largo de su recorrido a 2.400-3.000 kilómetros de distancia de las costas del sur de Australia y Nueva Zelanda. Al llegar a la isla volcánica de Buckle, cuya última erupción se produjo en 1899, la dorsal gira bruscamente hacia el norte a 5.000 kilómetros del extremo septentrional de Sudamérica y se convierte en la dorsal del Pacífico Este; esta dorsal pasa por la isla de Pascua y llega hasta las Galápagos, en donde hubo algunas erupciones el año 1970. Desde las Galápagos, y en dirección al noroeste, se dirige hacia el golfo de California, en donde encontramos los dos últimos volcanes asociados con esta dorsal: el volcán Bárcena, en la isla de San Benedicto, a 600 kilómetros de las costas occidentales de México, y el volcán Tres Vírgenes, en la península de Baja California. A partir de este punto, la dorsal medio-oceánica discurre por debajo del continente norteamericano provocando movimientos expansivos, vulcanismo y los frecuentes terremotos relacionados con el nefasto sistema de fallas de San Andrés.

La Tierra está rodeada, por tanto, por un sistema de grandes ejes expansivos que conforman las dorsales medio-oceánicas; ya hemos visto lo

estrechamente vinculadas que están las mismas con la actividad volcánica. Ya sabemos que la nueva corteza no se puede formar en esos ejes expansivos sin ser destruida en las zonas de subducción, situadas en los bordes de placas destructivos. Todos los bordes destructivos, que prácticamente circundan el océano Pacífico, tienen algunos elementos en común. En la parte de la placa oceánica más próxima al continente se hallan las fosas oceánicas, mientras que en la parte de la placa continental más próxima al océano se extienden grandes cinturones volcánicos de 200 a 300 kilómetros de ancho. Esos bordes de placas constituyen zonas sísmicas activas. Debido a que algunos de los volcanes más activos del mundo están situados en los márgenes del Pacífico, se habla de ellos aplicándoles el nombre colectivo de "anillo de fuego circum-pacífico".

Los volcanes más meridionales del mundo se alzan entre los desiertos de hielo barridos por los vientos del continente antártico, donde mueren los últimos ramales de la Cordillera Andina. Las montañas y los volcanes de la Tierra de Maria Byrd y de la península de la Tierra de Graham constituyen precisamente la terminación de los Andes. Los volcanes de la isla Decepción y de la isla Lindenberg no forman parte de esta cadena, que pasa por las islas Sandwich del Sur y Georgia del Sur antes de adentrarse en Sudamérica por la Tierra del Fuego. En realidad, los Andes comienzan aquí, a pesar de que en las inmensas soledades del extremo sur del continente americano no alcancen las extraordinarias proporciones que adquirirán más hacia el norte. No obstante, entre la multitud de islas y fiordos que se recortan en las costas del sur de Chile y Argentina ya aparecen algunos volcanes dignos de mención. El Monte Burney, el volcán más meridional de Chile, se eleva solitario muchos kilómetros al sur de su vecino más inmediato, el Lautaro; más hacia el norte, los volcanes son muy abundantes. Algunos de los volcanes más activos y peligrosos de América y del mundo se hallan en la Cordillera Andina, repartidos entre Chile, Perú, Ecuador y Colombia. En 1932, el Descabezado Grande, en Chile, entró en erupción y sus cenizas llegaron hasta Río de Janeiro, a 3.000 kilómetros de distancia; en Argentina, al este del volcán, extensas regiones quedaron cubiertas de blancas partículas de piedra pómez. En 1963, el volcán Villarica, también en Chile, entró en erupción fundiendo grandes cantidades de hielo y nieve que se convirtieron en catastróficas coladas de barro que causaron daños de importancia en los pueblos del pie de la montaña. En la misma frontera chileno-peruana está El Misti, un volcán potencialmente peligroso que se alza 3.500 metros por encima de Arequipa, construida sobre las potentes coladas de lava depositadas por el mismo volcán en el curso de antiguas y violentas erupciones. Si estas erupciones se produjesen en la actualidad, la ciudad de Arequipa sería borrada del mapa. En Ecuador hay cuatro grandes

volcanes activos: Reventador, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay; todos ellos han experimentado violentas erupciones en tiempos históricos, despidiendo columnas de cenizas de más de 20 kilómetros de alto y produciendo explosiones audibles a 600 kilómetros de distancia. En 1976, el volcán Sangay quitó la vida a varios miembros de una expedición de escaladores. Los volcanes colombianos Galeras y Purace se han comportado de manera parecida a sus vecinos ecuatorianos. Por fortuna, la mayoría de los 59 volcanes activos catalogados en Sudamérica están situados en regiones remotas, por lo que no representan un peligro inmediato para el hombre. Si se censasen todos los volcanes de esas regiones, incluyendo los que por unas razones u otras no han sido considerados activos, la cifra definitiva sería del orden de varios centenares.

En Colombia, la Cordillera Andina se bifurca en dos: un ramal se dirige hacia América Central, mientras que el otro se orienta hacia el noreste, cruza Venezuela y llega hasta la multitud de islas de las Pequeñas Antillas; en Haití este segundo ramal se curva y vuelve a entrar en América Central por el norte de Nicaragua. En América Central hay 43 volcanes activos, algunos de los cuales son extremadamente peligrosos. En 1932, por ejemplo, ardientes avalanchas procedentes del Santa María, en Guatemala, se deslizaron por el valle del río Tambor, en donde originaron coladas de barro en ebullición que causaron grandes pérdidas, tanto en vidas humanas como materiales. El volcán Irazu, en Costa Rica, provocó tal concentración de cenizas en la atmósfera que empezaron a desatarse torrenciales lluvias de barro en lugar de agua. Desde Colombia, el ramal occidental asciende hacia Costa Rica, Nicaragua, El Salvador y Guatemala; todo este tramo está jalonado por una línea prácticamente recta de volcanes activos. En México, la cadena se orienta en dirección oeste-noroeste, yendo desde Veracruz, a orillas del Caribe, hasta Guadalajara, en la costa del Pacífico; en las islas próximas a la costa hay algunos volcanes que marcan el fin de este ramal de la cadena. Los volcanes de América Central y de México son muy activos y muchos de ellos son potencialmente peligrosos. Entre éstos se cuentan el Izalco en El Salvador, el Fuego en Guatemala y el Colima en México. A éstos hay que añadirles el complejo volcánico descubierto por uno de los autores al oeste de Guadalajara. Hasta 1973 nadie se había dado cuenta de la amenaza permanente a que estaba sometida esta ciudad, edificada toda ella sobre antiguas coladas de lava; ese año se localizó la caldera parcialmente enterrada del volcán La Primavera, juntamente con su lago de cráter fósil.

La cadena volcánica reaparece en las Montañas de las Cascadas de los estados de California, Oregón y Washington, volviendo a morir momentáneamente en el Monte Baker, cerca de la isla de Vancouver. Vuelve a reaparecer cerca de Anchorage, desde donde el "anillo de fuego" prosigue hacia las islas Aleutianas, en donde hay numerosos volcanes, y la península de Kamchatka, al este de Siberia; Kamchatka es una región extremadamente activa en la que está situado el explosivo volcán Bezymianni. Hacia el sur, en las islas Kuriles y el Japón encontramos algunos de los volcanes más famosos y destructivos del mundo, como el Fujiyama, el Asama y el Bandai San. Cerca de Tokio la cadena vuelve a ramificarse; el ramal oriental se dirige al sur, hacia Nueva Guinea, pasando por las islas Marianas; el ramal occidental pasa por las islas Ryukyu, Taiwan y las Filipinas hasta llegar a Indonesia, donde se produjo la gran erupción del Krakatoa. La rama occidental continúa a través del Archipiélago Indonésico, pero hacia el este pasa por Nueva Guinea, las islas Salomón y Nuevas Hébridas y el archipiélago de Kermadec-Tonga, penetrando finalmente en la isla Norte de Nueva Zelanda. Algunos volcanes aislados, como la isla Buckle en el Pacífico Sur y el volcán Erebus en la Antártida, cierran el "anillo de fuego"; no obstante, no puede decirse que estos últimos volcanes aislados estén asociados con el vulcanismo típico de los márgenes continentales y de los arcos insulares.

Se cree que muchos volcanes aislados situados en el centro de las placas corticales están en la vertical de puntos calientes o ascensos del manto relativamente fijos (véase el capítulo 3). Esto implica la formación de sucesiones de volcanes a medida que la placa va desplazándose sobre el punto caliente; en un momento dado, el volcán activo será el que esté situado sobre dicho punto. En el Pacífico existe una alineación de antiguos volcanes, atolones y guyots que, arrancando de las islas Hawaii, se dirige hacia el ONO. Lo más interesante de esta alineación es que la edad de los distintos edificios volcánicos va aumentando a medida que nos alejamos de Hawaii; eso parece indicar que en esa zona la placa del Pacífico pasa por encima de un punto caliente relativamente estacionario enraizado en el manto en la vertical de Hawaii; el vulcanismo existente en las islas estaría originado precisamente por ese punto caliente. Hay otros muchos ejemplos, repartidos por todo el mundo, que apoyan esta teoría. De los tres emplazamientos volcánicos descritos, el más destructivo es el vulcanismo de margen continental y arco insular; las más catastróficas erupciones ocurridas en tiempos históricos se han producido en este tipo de volcanes.

Hay volcanes de todas las formas y tamaños; su actividad es asimismo muy variable, pero está más o menos relacionada con el entorno geológico. Los volcanes de las dorsales medio-oceánicas, por ejemplo, son bastante distintos de los volcanes de los márgenes continentales y de los que se hallan en los valles de rift continentales. Incluso dentro de una misma región pueden haber considerables variaciones en el tipo de actividad volcánica. ¿Qué es pues lo que controla estas variaciones en la actividad y cuál es

su posible significado social y económico? Los diferentes estilos de vulcanismo se deben a factores distintos que pueden influir sobre el resultado final operando aisladamente o en combinación. La explosividad depende de la viscosidad de las rocas fundidas, de su fluidez o de su pastosidad y de su contenido potencial en gases. Los magmas que contienen grandes cantidades de gases suelen ser responsables de erupciones muy activas y, a menudo, violentas, especialmente si las lavas son tan viscosas y pastosas que impiden que los gases escapen hacia la atmósfera. Esto hace que en el interior de la masa fundida el gas alcance presiones tan elevadas que cuando escapa lo hace forzosamente de forma violentamente explosiva. La viscosidad del magma está controlada por su temperatura y por su composición química; a su vez, estos dos factores dependen de la naturaleza de las rocas a partir de las cuales se formó el magma y del grado de contaminación del magma original (es decir, de la adición de nuevos fragmentos de rocas distintas a las originales durante su largo ascenso hacia la superficie). La roca volcánica típica de las dorsales expansivas, de los ascensos del manto y de los volcanes oceánicos es el *basalto*. Los magmas basálticos proceden de la fusión parcial del manto superior a profundidades que oscilan entre 50 y 160 kilómetros por debajo de la superficie de la Tierra. En los arcos insulares y en los cinturones del repliegue a lo largo de los márgenes continentales destructivos, los depósitos volcánicos están caracterizados por la presencia adicional de *andesita*, o incluso de una roca más sálica, la *riolita* (que suele presentarse más en forma de depósitos piroclásticos que de coladas de lava). Los magmas andesíticos se originan aproximadamente a las mismas profundidades que los magmas basálticos, en los lugares (zonas de subducción) en que una placa se hunde debajo de otra, fundiéndose parcialmente y siendo reciclada en la parte superior del manto. Los magmas más sálicos pueden deber parcialmente su formación a los procesos de interacción entre el magma andesítico ascendente y la corteza continental profunda.

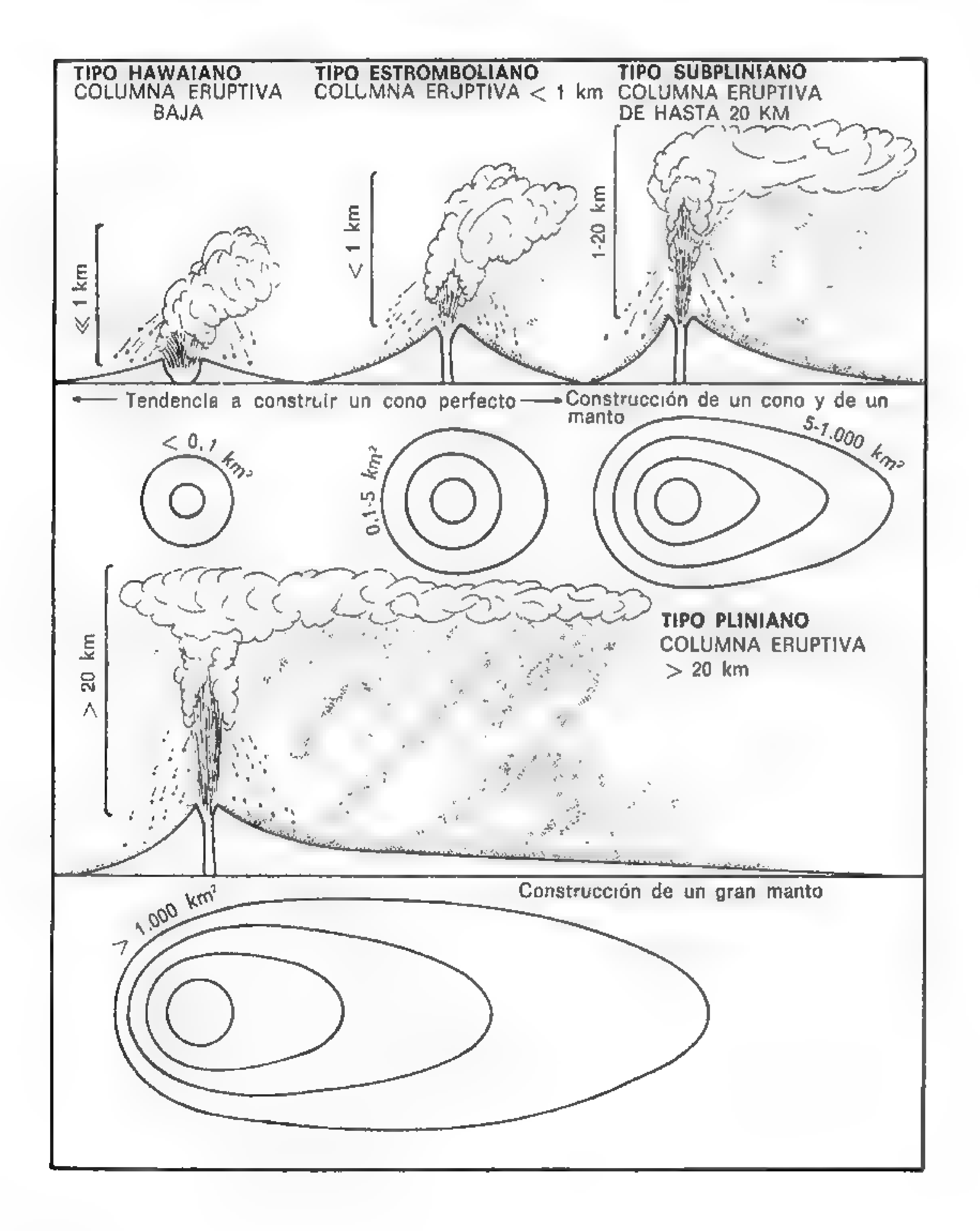
No obstante, en el interior de la Tierra se operan muchos procesos que pueden transformar los magmas basálticos o andesíticos en productos más sálicos. Cuando un magma permanece en una cámara magmática durante un largo período de tiempo, en términos geológicos, sus componentes químicos pueden irse separando lentamente. La gravedad juega un papel muy importante en esta separación diferencial de los elementos pesados y los ligeros; a consecuencia de esto, los componentes más básicos del magma se acumularán en el fondo de la cámara, mientras que los más ligeros y más sálicos se concentrarán en las partes superiores de la misma. Si a partir de esta cámara magmática, que ha estado en reposo durante algunos cientos o miles de años —y algunos volcanes tienen períodos de calma igualmente

largos—, se inicia una erupción, los primeros materiales que alcancen la superficie estarán constituidos por un magma relativamente sálico. Serán materiales muy viscosos y muy ricos en gases, los componentes más ligeros resultantes de la separación química previa, y su temperatura será inferior a la del magma que se halla en el fondo de la cámara. Al ir descendiendo la temperatura en el techo de la cámara magmática, los distintos componentes empiezan a cristalizar y los gases quedan en disolución o en exsolución. Son precisamente estas acumulaciones de magmas parcialmente enfriados y, por tanto, rígidos, altamente cargados en gases en el techo de las cámaras magmáticas, lo que confiere un poder potencialmente explosivo a este tipo de erupciones.

La parte inferior de la cámara, en la que se halla el magma más fluido y más básico —resultante de la diferenciación—, será relativamente pobre en gases disueltos. Cuando este magma más fluido sale al exterior, su violencia eruptiva es muy inferior; en los estadios finales de actividad, la lava puede fluir tranquilamente en forma de rocas fundidas desgasificadas desde el interior de un volcán anteriormente explosivo. Normalmente, en el curso de una erupción el magma va saliendo cada vez más desgasificado.

El vulcanismo *hawaiano* es la forma más suave de vulcanismo; el nombre procede de las islas homónimas del Pacífico en las que este tipo de actividad es frecuente. La ausencia de violencia durante las erupciones se debe al carácter fluido y a la baja viscosidad de la lava, lo que facilita una rápida evacuación de los gases. Durante las erupciones de tipo hawaiano pueden depositarse grandes volúmenes de lavas basálticas procedentes de fisuras u orificios alrededor de los cuales se desarrollan conos muy aplanados. Sin embargo, incluso en estos volcanes el agua puede penetrar en algunas ocasiones hasta el interior de las chimeneas magmáticas; la rápida conversión de esta agua en grandes volúmenes de vapor sobrecalentado puede provocar violentas explosiones. No obstante, y por fortuna, este tipo de explosiones sólo ocurren excepcionalmente. Las surgencias de lava de las chimeneas más activas no son más que enormes manifestaciones de fuego de artificio y no suelen constituir un grave peligro. A menudo, la lava desgasificada fluye tranquilamente por una boca situada a cierta distancia del cráter principal; la mayor parte de los gases disponibles ha sido empleada para alimentar las eyecciones piroclásticas. Las principales dificultades originadas por este tipo de erupciones se deben a la elevada movilidad de sus lavas, las cuales cuando fluyen en grandes cantidades por las laderas pueden destruir los campos, las vías de comunicación e incluso algunos pueblos aislados. No obstante, en la gran mayoría de los casos los sistemas de alarma garantizan la seguridad de la población y las pérdidas de vidas son raras.

Las erupciones hawaianas son las que producen las mayores coladas de lava. En el pasado reciente, en algunas islas oceánicas se han acumulado coladas de más de 900 metros de espesor. La colada miocénica de Roza, al este de Washington, EE.UU., cubre una superficie de 50.000 kilómetros cuadrados, con un espesor medio en la mayoría de sectores de 30 a 45



metros; ¡esto representa un volumen de más de 2.500 kilómetros cúbicos de basalto! Las grandes erupciones basálticas dan lugar a la formación de las plataformas de lava, relativamente abundantes en la columna estratigráfica de la mayoría de continentes. Entre los ejemplos más destacados cabe citar la plataforma basáltica terciaria del este de Groenlandia, las islas Feroes y Antrim; los basaltos miocenos del río Columbia en los Estados Unidos; los basaltos fini-cretácicos/terciarios inferiores del desierto del Decan, en la India; los basaltos cretácicos del Paraná en Brasil; y las coladas basálticas jurásicas del Karoo en el sur de África. Las superficies inundadas por estas grandes coladas de lavas del pasado eran literalmente enormes: los basaltos del Paraná ocupan 1.300.000 kilómetros cuadrados de territorio, mientras que los basaltos del Karoo probablemente llegaron a cubrir una superficie de 2.000.000 de kilómetros cuadrados. Es posible que en el futuro ocurran de nuevo manifestaciones volcánicas de estas gigantescas proporciones. Cuando esto ocurra, la gran fertilidad de los suelos que se desarrollen sobre las lavas basálticas bajo condiciones climáticas adecuadas atraerá a los pueblos agrícolas; sin embargo, esta recuperación del suelo con fines agrícolas únicamente podrá llevarse a término si se instalan servicios de vigilancia volcánica convenientemente equipados y preparados.

El siguiente peldaño, en sentido creciente, en la actividad volcánica está constituido por el llamado vulcanismo *estromboliano* (o piroclástico). En este tipo de volcanes, los gases que escapan por el cráter provocan

◀ **Fig. 23.** Los cuatro tipos de vulcanismo representados en la figura muestran claramente las interrelaciones existentes entre la viscosidad, la magnitud de la erupción y la superficie afectada por la caída de cenizas.

La viscosidad es una medida de la fricción interna de un líquido. Es baja en los basaltos y alta en los granitos y rocas similares fundidas. Los magmas de baja viscosidad forman capas poco potentes y se desplazan con gran rapidez, hechos ambos que facilitan el escape de los gases sin que se produzcan manifestaciones explosivas. El vulcanismo hawaiano y el estromboliano están caracterizados por mezclas fundidas de baja viscosidad y sus columnas eruptivas no llegan a alcanzar el kilómetro de altura. Los fragmentos expulsados caen en un área relativamente pequeña y alrededor de las chimeneas tienden a formarse conos casi perfectos.

Los magmas de alta viscosidad forman capas potentes y pastosas, como brea o caramelo. Esto impide que las burbujas de gas escapen con facilidad, lo cual incrementa considerablemente la presión de gases, culminando en violentas erupciones explosivas. Las columnas eruptivas pueden superar fácilmente los 20 kilómetros de altura y los productos de la erupción se esparcen a lo largo y ancho de superficies de hasta 1.000 kilómetros cuadrados.

Del cráter salen dos tipos de materiales; los más ligeros son arrastrados por el viento y siguen trayectorias no balísticas mientras, que los más densos no son afectados por el viento y siguen trayectorias balísticas, cayendo en las inmediaciones del cráter.

frecuentes explosiones de las que salen despedidas grandes cantidades de fragmentos de lava incandescente; la acumulación de estos fragmentos alrededor de la chimenea es lo que constituye los característicos acúmulos cónicos que proporcionan la imagen típica de los volcanes. La actividad estromboliana puede ser de tranquila a violenta; los fragmentos de lava expulsados por el volcán son muy ricos en gases que, al expanderse, dilatan la roca plástica original convirtiéndola en un material de elevada porosidad denominado "escoria"; los materiales más finos expulsados por este tipo de volcanes son cenizas y polvo que, al ser arrastrados por el viento, pueden viajar a través de grandes distancias causando daños a la agricultura en lugares muy alejados del propio volcán. Si las bombas de lava o proyectiles expulsados por el volcán tienen una cantidad excesiva de gases, pueden explotar en el aire, tal y como ocurrió en la erupción del volcán Paraicutín del año 1948, en México.

La actividad estromboliana debe su nombre al volcán Stromboli, que constituye una pequeña isla al norte de Sicilia; este volcán ha sido llamado "el faro del Mediterráneo" porque se ha mantenido permanentemente en erupción de este modo a lo largo de siglos. Prácticamente en todos los campos volcánicos del mundo existen en gran número pequeños conos adventicios de cenizas en los que se desarrolla una actividad de tipo estromboliano. Las vertientes de muchos grandes volcanes, como el Etna, en Sicilia, están llenas de esos pequeños conos adventicios.

Otros dos tipos de actividad volcánica son la *surtseyana* y la *vulcaniana*. Con la palabra "surtseyana" se designa el tipo de actividad volcánica violenta, piroclástica y explosiva que se produce cuando grandes cantidades de agua entran repetidas veces en el interior de una chimenea volcánica de lava próxima o inmediatamente por debajo del nivel de las aguas en el mar o en un lago. Se forman enormes oleadas de nubes blanquecinas de vapor de agua mezclado con finas partículas oscuras de cenizas y grandes bombas volcánicas. Este tipo de erupción ocurrió durante los primeros estadios de formación de la nueva isla islandesa de Surtsey, en el océano Atlántico, el año 1963. La actividad vulcaniana recibe su nombre del famoso Vulcano, en las islas Eólidas, al norte de Sicilia. Las erupciones vulcanianas son extremadamente explosivas; los materiales proyectados por este tipo de vulcanismo suelen ser mayormente pequeños fragmentos de lava semi-solidificada procedente de la chimenea activa, mezclados con fragmentos de lavas más antiguas, intrusiones subvolcánicas y rocas piroclásticas del propio cono. La cantidad de lava reciente que se forma en cada explosión es generalmente bastante limitada, por lo que las explosiones vulcanianas, a pesar de su violencia, no constituyen las formas más violentas de actividad volcánica. Las alternancias entre fases con actividad estromboliana y fases con actividad vulcaniana pueden dar lugar a la formación de grandes volcanes compuestos en cuya estructura se alternan las coladas de lava y las capas de cenizas.

En lo más alto de la escala de violencia eruptiva se sitúa un tipo de actividad que fue citado por primera vez por Plinio el Joven; a este autor clásico se debe la primera descripción científica escrita de una erupción volcánica por un testigo de vista, la del Vesubio, en el año 79, que destruyó las ciudades de Pompeya, Herculano y Estabia. La erupción se produjo durante el reinado de Tito César y está brillantemente descrita en dos cartas que Plinio el Joven envió a su amigo el historiador Cornelio Tácito y en las que le contaba las circunstancias que rodearon la muerte de su tío, Plinio el Viejo.

Dieciséis años antes de la erupción, un gran terremoto había sacudido la región de Pompeya y Herculano, causando daños de consideración en numerosos edificios. A lo largo de la década siguiente se produjeron otros muchos terremotos en las inmediaciones del volcán; sin embargo, se les prestó muy poca atención (su importancia sólo sería descubierta por los científicos 1.800 años más tarde). El 24 de agosto del año 79, el creciente número de temblores de tierra culminó con la erupción del Vesubio, un volcán que se creía extinto a pesar de que nosotros sepamos en la actualidad que ya había experimentado una importante erupción 1.300 años antes. En el espacio de unas pocas horas la ciudad de Pompeya quedó enterrada bajo una capa de cenizas volcánicas de unos 3 metros de espesor; la cercana ciudad de Estabia corrió una suerte parecida. La mayoría de los habitantes de Pompeya abandonaron la ciudad cuando se dieron cuenta del peligro que corrían; sin embargo, y aprovechando breves intervalos de calma, algunos volvieron a recuperar sus pertenencias, o a apoderarse de las de los demás. Probablemente, las cenizas sólo sepultaron a los viejos, los enfermos y los inválidos, y a aquellos que regresaron a la ciudad por un motivo u otro; son precisamente los restos fosilizados de estos infortunados los que de tanto en tanto van siendo descubiertos en el curso de las excavaciones arqueológicas que se realizan en Pompeya. Los animales atados debieron morir entre atroces sufrimientos, tal y como lo atestiguan los restos de un perro (lámina 19).

Cuando la erupción comenzó, Plinio el Viejo se hallaba en Miseno, en el extremo norte de la Bahía de Nápoles. Estaba muy ocupado ya que tenía a su cargo una flota de embarcaciones; con él estaban su hermana y su sobrino, Plinio el Joven. El joven Plinio explica:

> A primeras horas de la tarde del día 24 de agosto, mi madre llamó la atención a mi tío acerca de una nube muy grande que había aparecido en el cielo. Mi tío estaba

> atareado escribiendo, no sin antes haberse bañado y haber comido. Se puso sus zapatos y se encaramó hasta lo alto de un lugar elevado para ver mejor la erupción, la cual, al parecer, procedía de una montaña muy alta llamada Vesubio. La nube tenía forma de paraguas, con un grueso palo central del que salían numerosos radios A veces se veía oscura y a veces clara.

Según esta descripción, es bastante obvio que la gran nube estaba constituida por una mezcla de vapor y cenizas volcánicas procedentes del cráter del volcán. Plinio el Joven continúa diciendo: "Mi tío se dio cuenta de que aquel fenómeno merecía ser admirado más de cerca, y ordenó que echaran un bote al agua para aproximarse al mismo; me dijo que si quería podía acompañarle." Sin embargo, el joven Plinio decidió continuar con sus estudios y declinó la invitación de su tío. Cuando el tío ya estaba listo para marcharse, recibió un mensaje de Rectinia, la mujer de su hermano Baso, cuya casa estaba situada a los pies del Vesubio. En él, Rectinia le explicaba que se marchaba en grave peligro y que sólo podía huir por mar, por lo que le rogaba a Plinio el Viejo que fuese a rescatarla. Una hora después del inicio de la erupción, los barcos ya estaban listos para zarpar; el interés científico que animó originalmente a la expedición fue sustituido por el deseo de salvar, no sólo a Rectina, sino a otros muchos infortunados que vivían a lo largo de aquella hermosa franja costera. Al mando de sus naves, Plinio el Viejo se dirigió hacia la zona de peligro, que sus habitantes abandonaban desesperadamente. "Mi tío no tenía el menor temor y dio instrucciones para que fuesen cuidadosamente anotadas todas sus observaciones durante las distintas fases de la erupción."

Serían aproximadamente entre las tres y las cuatro de la tarde; a medida que los barcos iban acercándose a la costa, iban cayendo a su alrededor y encima de los mismos cantidades cada vez mayores de cenizas, piedra pómez y rocas ardientes; las aguas más próximas a la playa estaban saturadas de productos volcánicos. Viendo la imposibilidad de llevar a buen término la operación de rescate, el viejo Plinio retrocedió mar adentro; a continuación se dirigió hacia Estabia, con el fin de encontrarse con Pomponiano, el cual, al parecer, ya había embarcado sus pertenencias y sólo estaba esperando hacerse a la mar a la menor oportunidad. Plinio el Viejo abrazó al atemorizado Pomponiano y juntos decidieron permanecer a la espera durante la noche; aquel día cenaron con la amenazante sombra de la montaña proyectándose sobre sus cabezas. Desde diferentes puntos del volcán se elevaban al cielo grandes llamaradas de las que Plinio decía, con la intención de tranquilizar a sus amigos, que no se trataba más que de hogueras o casas en llamas. Plinio el Joven prosigue contando: "No hay duda de que mi tío durmió estupendamente aquella noche, ya que todos

los que estuvieron cerca de su habitación pudieron oír su profunda respiración. Después de todo, era un hombre muy corpulento."

Mientras tanto, en Miseno se estaban produciendo violentos terremotos que también fueron percibidos en Estabia, en donde la altura de las cenizas, en el exterior de la habitación de Plinio el Viejo, había aumentado considerablemente.

> Mi tío fue despertado por sus amigos, quienes temían ser enterrados vivos. Cuando vieron que los edificios temblaban violentamente decidieron buscar su seguridad al raso. Se pusieron almohadillas sobre la cabeza para protegerse de la caída de piedras y se aprestaron a correr el riesgo. La densa lluvia de cenizas y polvo había oscurecido el ambiente de tal manera que tuvieron que utilizar antorchas para acercarse a la costa con el fin de comprobar el estado de la mar. El mar estaba tan agitado que era imposible escapar por él. Habiendo decidido esperar a que el tiempo mejorase, mi tío se tumbó en la playa, encima de una sábana. Mientras estuvo allí, pidió varios vasos de agua; después, las llamas cada vez más cercanas y los gases asfixiantes obligaron a mi tío a ponerse en pie. Lo hizo, apoyándose en dos bastones, y entonces, de repente, se derrumbó.

Según el texto original, parece que Plinio el Viejo fue dado por muerto aquel mismo instante. Cuando la luz del día volvió a brillar, el 26 de agosto, su cuerpo aún yacía intacto sobre la playa con la apariencia de un anciano durmiendo.

Precisamente ese mismo día, relata Plinio el Joven, terribles terremotos azotaron Miseno provocando el pánico entre su población; la gente huía desesperadamente de sus casas, que se estaban derrumbando sobre sus cabezas. "Olas de marea" arrojaron grandes cantidades de peces sobre la playa. Mientras tanto, la erupción proseguía con furia creciente originando enormes nubes negras que los relámpagos rasgaban. Se vio cómo una de esas nubes se derramaba sobre el suelo como si fuese una gran masa de agua, adentrándose en el mar en Capri y Miseno. Este último evento fue, sin duda, una de las manifestaciones más terribles: una colada piroclástica. Mientras en la vertiente inferior del Vesubio Pompeya iba quedando sepultada bajo las cenizas, en la vertiente superior se iban acumulando grandes cantidades de piedra pómez y cenizas. Las lluvias torrenciales que frecuentemente acompañan a las grandes erupciones saturaban esas cenizas y provocaban el deslizamiento de grandes coladas hacia las partes bajas de la montaña. Esas coladas de fango y cenizas iban incorporando nuevos derrubios a medida que se deslizaban pendiente abajo, incrementándose así su volumen total. Herculano quedó sepultada bajo coladas de este tipo. Las excavaciones efectuadas en Herculano han revelado la ausencia de restos humanos entre las ruinas, lo que parece indicar que la población tuvo tiem-

po de evacuar la ciudad antes de que ésta fuese totalmente sepultada por las coladas de fango y cenizas.

Puesto que fue Plinio el primero que describió este tipo de erupciones, tipificadas por la que ocurrió en el Vesubio el año 79, a las mismas se les aplica el nombre de erupciones de tipo *pliniano*. Se caracterizan por la expulsión continua o a intervalos regulares de grandes cantidades de gas en un período de tiempo comparativamente corto, muy a menudo de horas, y en la mayoría de los casos de dos a tres días de duración. Durante el período de máxima violencia eruptiva quedan expulsados volúmenes enormes de cenizas y fragmentos de piedra pómez, los cuales, al salir, constituyen la denominada *columna eruptiva*. Estos productos pueden caer alrededor de la chimenea o ser arrastrados por el viento antes de caer al suelo, en donde formarán una capa de cenizas parecida a la capa de nieve que queda después de una gran tormenta invernal. Estas gruesas capas de cenizas pueden sepultar ciudades enteras, tal y como ocurrió en Pompeya el año 79, y casi igual en Vestmannaeyjar el año 1973.

El área cubierta por los productos de una determinada erupción recibe el nombre de área de dispersión de esa erupción. Las áreas de dispersión suelen ser elongadas cuando interviene el viento en la dispersión de los productos volcánicos y circulares cuando las condiciones meteorológicas imperantes durante la erupción están en calma. Los fragmentos más grandes y pesados caen cerca del cráter, mientras que las partículas más finas y ligeras pueden recorrer grandes distancias antes de caer al suelo; la distancia a la que caen depende de lo que se denomina su velocidad de caída terminal en la atmósfera. Los vulcanólogos pueden llegar a conocer de qué manera se han comportado los distintos volcanes en el pasado a partir del estudio detallado del grado de clasificación (un parámetro granulométrico) que presentan sus depósitos; este grado de clasificación depende para cada volcán de las características de su *actividad piroclástica*. El estudio de la actividad de los volcanes en el pasado tiene una gran importancia porque es uno de los principales puntos de referencia utilizados en la predicción de su comportamiento futuro. Obviamente, la forma del área de dispersión indica la existencia de corrientes de aire durante la erupción y su dirección. Incluso, asumiendo la altura que pudo alcanzar la columna eruptiva, es posible calcular la velocidad relativa del viento. Las formas de las *isopletas* —líneas de igual valor referidas al tamaño en este caso— de los máximos de piedra pómez y de fragmentos líticos (rocas sólidas densas) pueden indicarnos la inclinación aproximada de la chimenea o del cráter. Tales distribuciones indican, además, la forma de los penachos eruptivos, si eran estrechos o ampliamente divergentes. La medición de los espesores de la capa de cenizas a lo largo y ancho de la zona de dispersión nos permite calcular

el volumen total de los materiales expulsados durante la erupción, y nos permite comparar las magnitudes de distintas erupciones. Estos aspectos son muy importantes cuando se trata de estudiar las posibilidades de predicción de las erupciones y la disminución del factor de riesgo.

Sin embargo, en los depósitos de las antiguas erupciones volcánicas están encerrados una gran cantidad de secretos. A partir del estudio de los depósitos de cenizas volcánicas puede saberse también si estaba lloviendo o no durante la erupción; cuando las gotas de lluvia caen y se incorporan a los turbulentos movimientos que tienen lugar en el seno de las nubes eruptivas, se forman unas bolitas de fango esféricas denominadas *lapilli acrecionario*. Las bolitas de lapilli acrecionario halladas en antiguos depósitos volcánicos son, en esencia, gotas de lluvia fósiles y constituyen una prueba indudable de la existencia de tormentas de agua durante la erupción. Cuando se producen fuertes corrientes ascendentes de aire saturado de cenizas y polvo volcánico, en el curso de violentas tormentas, se forman bolas de lapilli acrecionario de mayor tamaño. Se ha hallado lapilli acrecionario, formado en el decurso de terribles erupciones ocurridas en tiempos prehistóricos, en varios volcanes italianos, como el Vulsini, el Sabatini y el Laziale. Tal y como ya hemos sugerido anteriormente, puede darse el caso que estos volcanes no estén muertos y, por tanto, deben ser tratados como asesinos potenciales. Otras características observables en los depósitos volcánicos prueban la existencia de violentos relámpagos en medio del caos de la erupción. El movimiento ascendente de las columnas de vapor, gas y fragmentos sólidos, y el propio movimiento de las diferentes partículas y componentes en el interior de esas columnas generan enormes cantidades de electricidad estática. Esta electricidad estática fue la que causó la aparición de los fuegos de San Telmo en los mástiles y aparejos de los barcos que navegaban cerca de Krakatoa el año 1883. La gran cantidad de calor que se libera instantáneamente cuando esta energía eléctrica se disipa en forma de relámpagos que alcanzan el suelo da lugar a la formación de tubos de vidrio fundido revestidos por plaquetas de piedra pómez; una vez solidificados, estos tubos reciben el nombre de *fulguritas*.

Las erupciones plinianas no siempre se detienen después de la rápida expulsión inicial de grandes volúmenes de cenizas y piedra pómez; a menudo se produce un cambio en el estilo de la erupción, que deviene aún más peligrosa: es el tipo de actividad que llamó por primera vez la atención del hombre a raíz de los desastres del año 1902 en las Indias Occidentales. Ese año, el estudio científico detallado de las características y de los productos de las erupciones de la Soufrière y del Mont Pelée, aunque en una escala menor, pero no menos mortal, permitió que los geólogos pudiesen empezar a comprender una de las más terribles formas de catástrofe natural: el

"vulcanismo de flujos o coladas piroclásticas". Sin duda, la escala alcanzada por las dos erupciones de las Indias Occidentales no es comparable con las extraordinarias dimensiones que algunas erupciones de este tipo debieron tener en tiempos prehistóricos.

A finales de la fase pliniana de una erupción, puede que el nivel explosivo en la chimenea disminuya debido a que la mayor parte del magma ya ha sido expulsado; por tanto, los gases ascendentes gastan la mayor parte de su energía en expanderse a lo largo de una chimenea cada vez más alta, hasta que se equilibran con la presión existente en la superficie. Esto crea un efecto de jeringa o cañón, ya que aunque la cantidad de gas sea en realidad menor de la que había durante los estadios abiertos de la erupción, esta pequeña cantidad de gas puede producir mayores efectos debido precisamente al trabajo que realiza mientras se expande. Sin embargo, a medida que va decayendo la presión del gas también disminuye la altura de la columna eruptiva, y el gas saliente apenas tiene fuerza para arrastrar todo el material que hay en la chimenea hacia la cima del volcán. El resultado de todo esto es que la densa parte basal de la columna eruptiva empieza a caer lentamente hasta que se colapsa por completo. El material que se va desprendiendo se acumula alrededor del cráter y en las partes más altas del edificio volcánico en un equilibrio extremadamente inestable, debido a su rápida tasa de acumulación. Este cúmulo o anillo de material se desmorona bajo la influencia de la gravedad y desciende vertiginosamente por las laderas del volcán en forma de una avalancha incandescente de cenizas, polvo y fragmentos de lava. Estos flujos piroclásticos (en oposición a las lluvias piroclásticas de las que hemos hablado antes) se comportan como fluidos debido a que las partículas sólidas que contienen son sostenidas por una envoltura de gas caliente que lubrifica toda la masa. Los flujos piroclásticos, también llamados a veces nubes ardientes, pueden desplazarse a velocidades de más de 160 kilómetros por hora; además, y debido a su gran fluidez, pueden seguir los cursos fluviales y las depresiones topográficas. A menor escala, estas nubes asesinas también pueden formarse cuando la actividad que tiene lugar en el interior de una chimenea es capaz de desmenuzar, como un molino gigantesco, las rocas allí existentes pero no puede mantenerla abierta. En esta situación, en un momento dado, toda la masa fluidificada del interior de la chimenea puede salir por el borde del cráter como si se tratase de leche hirviendo desbordando de una cacerola.

Otros tipos de nubes ardientes se forman cuando una elevada presión de gases provoca la rotura de una arista de lava que sobresale de un volcán o cuando un domo de lava se derrumba de manera explosiva. Ambos mecanismos pueden también generar grandes masas fluidificadas de partículas de roca altamente fragmentadas sostenidas por gases a elevada temperatura; fue una nube de este tipo la que arrasó St. Pierre el año 1902. Las nubes ardientes dan muy pocas o ninguna señal de alarma, viajan con la velocidad de un huracán o de una onda atómica y están lo bastante calientes como para aniquilar y carbonizar instantáneamente a las personas. Son una especie de aerosol rocoso incandescente y, sin duda, son una de las más terribles manifestaciones volcánicas que existen. Para los vulcanólogos, cada nueva erupción que se puede observar significa la posibilidad de aumentar sus conocimientos; han obtenido gran cantidad de datos a partir de las explosiones provocadas durante las pruebas nucleares y durante la detonación de grandes cargas de TNT. La formación de grandes olas empujadas por vientos huracanados constituye uno de los rasgos característicos de las explosiones atómicas y, por lo que sabemos ahora, es también un rasgo típico de muchas erupciones volcánicas y de otros tipos de explosiones. Cuando el agua penetra en el interior de las chimeneas volcánicas próximas al mar, o a otros ambientes acuáticos, el vapor tan bruscamente generado provoca frecuentemente grandes explosiones que pueden determinar la formación de una o varias olas de componente horizontal, además de un penacho o columna dirigido hacia arriba. Estas olas forman una nube anular de bajo nivel que crece rápidamente en tamaño alrededor del volcán; cuando ocurren en tierra firme, estas "olas" reciben el nombre de "olas terrestres" para distinguirlas de las que se producen en los ambientes acuáticos.

A través de los tiempos geológicos se ha producido un número elevadísimo de flujos piroclásticos de dimensiones extraordinarias; sin embargo, ninguno de ellos ha podido ser visto por observadores especializados. En 1912, el Monte Katmai, en Alaska, entró en erupción liberando un gran flujo piroclástico que recorrió 22 kilómetros a lo largo de un valle que quedó cubierto bajo una capa de 30 metros de cenizas calientes. Los escapes de vapor procedente de la vegetación y de las aguas subterráneas que habían sido cubiertas por las cenizas persistieron durante muchos años, dando lugar a la aparición de una multitud de chorros de vapor y fumarolas; por esta razón, este valle recibe el nombre de "Valle de los Diez Mil Humos". Sin embargo, el flujo de Katmai es muy pequeño en comparación con algunos flujos prehistóricos y con otros habidos en tiempos geológicos más remotos. Actualmente sabemos que hay muchos volcanes activos capaces de producir flujos piroclásticos que podrían cubrir por completo una superficie tan grande como la mitad del estado de California en tan sólo unas pocas horas de horror incandescente.

El recubrimiento del relieve preexistente por la superposición de flujos piroclásticos sucesivos da lugar a la formación de extensas plataformas volcánicas. Una de las mayores plataformas de esta naturaleza conocidas por

la ciencia cubría buena parte de Nevada y las zonas vecinas de Utah hace algo así como unos 20 ó 30 millones de años. Dentro de este gran campo volcánico ha sido identificado un flujo piroclástico gigante cuya superficie es de unos 18.000 kilómetros cuadrados y cuyo volumen es de 1.000 kilómetros cúbicos. La "Bishop Tuff" (Toba del Obispo), que aflora en el extremo norte del Valle de Owens, en California, no es más que un flujo piroclástico de 60 metros de espesor que cubría una superficie de unos 1.000 kilómetros cuadrados hace unos 700.000 años. Se conoce la existencia de enormes campos de flujos piroclásticos geológicamente jóvenes en la isla Norte de Nueva Zelanda, Arizona, Nuevo México, Colorado, Wyoming, Sumatra, Japón, etc. En todas las zonas volcánicas del mundo existen sectores caracterizados por la ocurrencia de flujos piroclásticos. Se sabe que en tiempos geológicos pasados, diversas variantes del mecanismo de los flujos piroclásticos dieron lugar a muchos flujos volcánicos gigantes; la formación de las riolitas del Karoo, en el sudeste de África, de 189 millones de años de edad, constituye un ejemplo representativo de este tipo de flujos. También se sabe que en las profundidades de los océanos se producen diferentes tipos de flujos piroclásticos.

En 1875, el volcán islandés de Askja entró en erupción de una manera tan vigorosa que cuando gran parte de los fragmentos de piedra pómez que expulsaba caían al suelo aún estaban lo bastante calientes como para soldarse y formar una roca dura y compacta. Erupciones parecidas ocurrieron en el pasado en la isla de Pantelleria, en el Mediterráneo; también sabemos que en tiempos geológicos pasados muchos volcanes se comportaron de manera similar, dando lugar a la formación de las llamadas *cenizas aglomeradas*. El enterramiento de una gran ciudad bajo las cenizas volcánicas es un hecho terrible para cualquier comunidad, pero el enterramiento bajo una lluvia de fragmentos de rocas fundidas que al llegar al suelo están aún lo suficientemente calientes como para soldarse entre sí constituye un horror de proporciones mucho mayores. El puesto de honor de los fenómenos volcánicos catastróficos parece, pues, que debe ser compartido por los grandes flujos piroclásticos y las lluvias de cenizas y fragmentos capaces de soldarse, hechos ambos que tienen que ser todavía experimentados por el hombre civilizado.

Los corrimientos de tierras y las coladas de fango son los compañeros inseparables de muchos tipos primarios de actividad volcánica. Las coladas de fango volcánico y los depósitos torrenciales pueden ser tanto calientes como fríos, y las aguas implicadas en los mismos pueden ser extremadamente ácidas; son los llamados *lahars*, asesinos potenciales, tal y como ya hemos visto al describir el desastre del año 1953 en Nueva Zelanda, cuando un lahar causó la muerte de 151 personas que viajaban en el expreso Wellington/Auckland, y los hechos ocurridos en la Rivière Blanche, en Martinica, el año 1902, cuando 23 trabajadores de las destilerías Guerin perdieron sus vidas. De hecho, tan sólo en los tiempos históricos los lahars han matado a muchos miles de personas. Son particularmente frecuentes en las proximidades de los conos andesíticos con lagos de cráter de alto nivel y constituyen, además, uno de los productos más comunes del vulcanismo pliniano. Los flujos piroclásticos a menudo se transforman en lahares a medida que van progresando valle abajo.

Antes de que una erupción volcánica se desate se producen perturbaciones a lo largo de meses y, a veces, años que pueden pasar desapercibidas incluso para los observadores más experimentados. Esto es debido a que tales perturbaciones suelen consistir en temblores microsísmicos que sólo pueden ser detectados mediante instrumentos sísmicos muy sensibles. También pueden producirse temblores mayores, pero no suele hacérseles caso; los pequeños terremotos son atribuidos con demasiada frecuencia a alguna causa mundana, como el paso de un gran camión o de un tren. Estos leves temblores son provocados por los movimientos ascendentes del magma hacia la superficie de la Tierra, que hacen que aquél vaya abriéndose paso hacia arriba aprovechando las discontinuidades de las rocas. La velocidad de ascenso del magma aumenta a medida que éste va acercándose a la superficie, por lo que se incrementa la frecuencia de los temblores. Poco antes de que se produzca la erupción, los temblores pueden ser tan frecuentes que el suelo puede estar vibrando continuamente a escala microscópica. Los animales detectan estas perturbaciones y eso explica por qué muchos de ellos huyen de la proximidad de los volcanes poco antes de que entren en erupción. Los perros del rancho Warner, 8 kilómetros al este de Pahoe, en Hawaii, empezaron a correr alrededor de los agujeros de unas excavaciones y a husmear excitados hacia el interior de los mismos tres días antes de que se iniciara una erupción a unos pocos centenares de metros de distancia del rancho. Los temblores microsísmicos habían llamado, obviamente, su atención.

Con anterioridad al nacimiento de un nuevo volcán, se forma una fisura o una serie de fisuras en los lugares en que la presión es más alta o en los lugares en que había líneas de debilidad preexistentes; después que los gases que salen por la fisura eliminan el suelo y la roca que eventualmente pudiesen cubrirla y contribuyen a mantenerla despejada y a ensancharla, entonces empiezan a aparecer pequeños grumos de lava. Si el proceso continúa, la acumulación de grandes cantidades de estos grumos y gotas puede dar lugar a la formación de una verdadera colada de lava, como las que salen de las fuentes de lava permanentes de las Islas Hawaii; también puede ocurrir que esas acumulaciones sean expulsadas hacia lo alto, donde

se enfrían, para caer posteriormente alrededor de la grieta o chimenea e iniciando así la formación de un cono volcánico. Los temblores sísmicos premonitorios también se producen antes de las erupciones de los volcanes *poligénicos*, las cuales suelen ser mucho más vigorosas que las de los volcanes *monogénicos* que entran en erupción una sola vez.

La historia de un volcán corre paralela a la disminución de su presión de gases; a menudo parece que la actividad aumenta a medida que la erupción progresa, pero esto puede ser debido a que cuanto mayor es la profundidad de la explosión los gases gastan más energía en expanderse para situarse a la presión superficial. En una misma erupción pueden coexistir la formación de grandes llamaradas en la cima, asociadas con la expulsión más o menos violenta de materiales incandescentes, y el lento y tranquilo fluir de coladas de lava que emanan de fisuras en la parte inferior del volcán. En las fases finales de una erupción, el magma puede estar tan desgasificado que dé lugar a la formación de un flujo piroclástico, una cresta de lava o un domo, los dos últimos situados encima de la chimenea; todo ello puede ir seguido, a su vez, de otros flujos piroclásticos.

Cuando la piedra pómez y las cenizas han dejado de caer y la lava ha cesado de fluir, el volcán entra en un estadio fumarólico en el que sólo libera gases y calor residual. Este estadio, que puede prolongarse durante muchos años, depende de las reservas calóricas de la lava y las cenizas. Generalmente, la actividad fumarólica es tanto más persistente cuanto más gruesos son los depósitos resultantes de la erupción; sin embargo, si el escape de calor hacia la superficie es lento y si existe una lámina de agua subsuperficial, la actividad fumarólica puede persistir durante muchos años sin que sea necesaria la presencia de campos de cenizas o lava superficiales. Puede que las zonas con un subsuelo muy caliente estén situadas encima del techo de una cámara magmática, la cual constituirá una fuente permanente de energía geotérmica. Los campos geotérmicos de Larderello, en Italia, Rotorua, en Nueva Zelanda, y los géiseres de California e Islandia seguirán proporcionando calor y electricidad baratos durante muchos años. Este tipo de fuentes de energía están siendo objeto de intensas investigaciones en muchos países, aunque con un porcentaje de éxito muy variable.

Ya hemos visto que es posible trazar la distribución de los volcanes alrededor del mundo; éstos están relacionados, en la mayoría de los casos, con las dorsales medio-oceánicas, con las zonas de subducción de los márgenes continentales y de los arcos insulares, y con los puntos calientes y ascensos del manto; sin embargo, no existe un esquema o un modelo que nos permita saber cuándo van a producirse las erupciones. A veces, cuando varios volcanes situados en un área de dimensiones relativamente reducidas entran en erupción, la actividad volcánica puede ser debida a movimientos extraordinarios de gran importancia en una zona de subducción. Las zonas del mundo afectadas por terremotos altamente destructivos también pueden asociarse con este tipo de movimientos. El 18 de enero de 1902 un terremoto causó graves daños en las cercanías de Quezaltenango y a lo largo de toda la costa pacífica de Guatemala. El 17 de abril, Quezaltenango fué destruida y murieron 1.000 personas. El 25 de abril, el Mont Pelée, en la Martinica, entró en erupción. El 7 de mayo, el Soufrière, en la isla de San Vicente, en el Mar Caribe, también entró violentamente en erupción y al día siguiente, el Mont Pelée, situado unos pocos kilómetros al norte, golpeó St. Pierre con toda su furia. El 10 de mayo se despertó el volcán Izalco, en El Salvador; le siguió el Masaya, en Nicaragua, el día 15 de julio; ese año, 1902, también entraron en erupción el Concepción, en Nicaragua, y el Santa María y el Pacaya, en Guatemala. Es significativo que siete grandes volcanes de la placa del Caribe entrasen en erupción, algunos muy violentamente, en tan breve espacio de tiempo, apenas un año. Pero el registro de la actividad volcánica es demasiado incompleto como para permitir el establecimiento de los ciclos por los que se rigen tales eventos. Sin embargo, la disciplina científica llamada *tefrocronología* sirve a los vulcanólogos para conocer el ritmo y las características de las erupciones ocurridas en tiempos prehistóricos, a partir de la datación de muestras de carbono extraídas de las cenizas volcánicas. Gracias a los últimos avances de la vulcanología, podemos afirmar que muchos volcanes entran en erupción con una periodicidad manifiesta.

Quizás en el futuro se podrán establecer unos modelos retrospectivos, e incluso predictivos, acerca de las erupciones volcánicas en los que intervendrán tanto el factor tiempo como las fases de movimiento acelerado de las placas corticales.

No todos los volcanes son asesinos. Se han catalogado 516 volcanes activos, pero de éstos tan sólo 89 han causado daños durante los tiempos históricos. En la clasificación de daños, el Japón encabeza la lista con 14 erupciones catastróficas, seguido de Java con 12, y de las Filipinas y América Central, ambas con 6. El volcán Tambora, en las islas de la Sonda, es el que ha causado un mayor número de víctimas en el curso de una erupción; en 1815, violentas explosiones destruyeron la cima del volcán, saliendo despedidos más de 100 kilómetros cúbicos de cenizas y fragmentos de roca. Murieron entre 56.000 y 80.000 personas. Sin embargo, algunos especialistas estiman que durante la erupción del Etna del año 1669 pudieron haber perdido sus vidas 100.000 personas en la destrucción de la ciudad de Catania. En los tiempos modernos, el Krakatoa y el Mont Pelée son los volcanes asesinos más renombrados. Fue precisamente la catástrofe

de St. Pierre la que hizo que los científicos empezasen a preocuparse ante el riesgo que las nubes ardientes suponían para la vida humana.

Nuestras recientes investigaciones en México nos permiten afirmar sin la menor duda que la ciudad de Guadalajara está ubicada encima de una bomba de relojería cuya explosión puede revestir proporciones cataclísmicas. Detalladas observaciones efectuadas sobre el terremoto nos han permitido establecer los mapas de riesgo volcánico en los que quedan claramente delimitadas las zonas de mayor riesgo potencial ante futuras erupciones; por su parte, el análisis estadístico de los datos obtenidos nos ha permitido estimar con bastante aproximación las dimensiones y las características de las futuras erupciones. Es, por tanto, relativamente sencillo imaginar qué es lo que puede ocurrir durante tales erupciones. Por más situaciones de emergencia que se declaren, las autoridades se verán impotentes y decenas de miles de personas morirán.

Antes de la erupción principal, quizás algunos meses o incluso algunos años antes, se producirán bastantes pequeños terremotos que podrán ser percibidos con claridad en la vertical del volcán La Primavera, en Guadalajara. Estos terremotos estarán provocados por el ascenso de rocas fundidas procedentes de las profundidades de la Tierra, que irán abriéndose paso separando y rompiendo las rocas sólidas mientras se introducen en la parte baja del volcán calentando la cámara de magma dormida durante mucho tiempo. El calor y el material proporcionados por la cámara magmática darán al aparato volcánico el ímpetu necesario para volver a entrar en actividad; la cámara magmática se recargará y, debido al incremento de volumen que experimentará, el volcán entero tenderá a expanderse. Esta expansión puede ser medida en la superficie mediante sensibles instrumentos científicos, que nos indicarán dónde se están produciendo los mayores abombamientos y, por tanto, dónde existen las mayores posibilidades de que se produzca la explosión. Por desgracia, es muy probable que este tipo de mediciones no se lleven a cabo; la hinchazón pasará desapercibida y los terremotos quizá sean atribuidos al paso de vehículos pesados o a cualquier otra causa. Incluso es posible que nadie se fije en el incremento de temperatura que experimentarán las fuentes termales de las inmediaciones del complejo de La Primavera; en el mejor de los casos, este incremento de temperatura sólo será considerado una curiosidad natural más. Ante la ausencia de un sismógrafo local, únicamente podrán ser percibidos los terremotos de una cierta importancia; el número de terremotos por día irá aumentando progresivamente. Es improbable que se haya hecho nada para prevenir a la población del inminente peligro cuando los primeros chorros de gas y vapor empiecen a romper la superficie del terreno; ciertamente, las mayores posibilidades son de que no se haga absolutamente nada. "Eso no

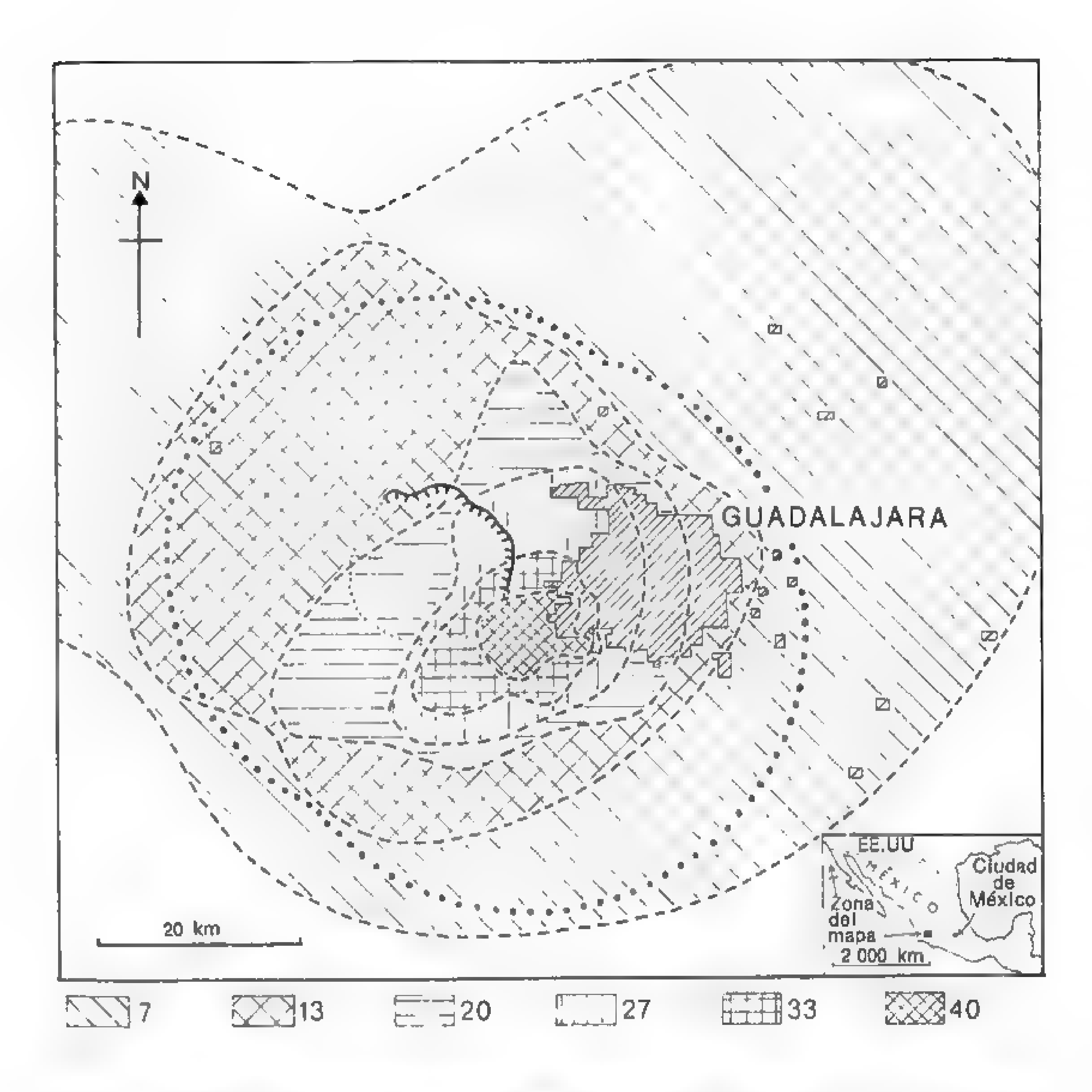


Fig. 24. Mapa de riesgos volcánicos de Guadalajara, México. En él se muestran los porcentajes de probabilidades que tiene de quedar enterrada debajo de un metro o más de cenizas durante la próxima gran erupción. También está indicada (línea de puntos gruesos) el área que corre el riesgo de que caigan sobre ella proyectiles de más de 10 centímetros. La abrupta vertiente de la caldera está indicada mediante la línea aserrada de trazo grueso.

La ciudad de Guadalajara está prácticamente encima de un volcán potencialmente peligroso y existe un riesgo muy alto de que la ciudad sufra daños generalizados o quede enterrada bajo capas de cenizas en el curso de futuras erupciones. Los flujos piroclásticos procedentes de este volcán han afectado la mayor parte del área que abarca este mapa. Si se produjese una gran erupción, no quedaría ni un superviviente a menos que se hubiese evacuado antes la ciudad.

puede ocurrirnos a nosotros", dirán, o "Sólo es otro Paricutín", y probablemente la actividad preliminar será explotada como una lucrativa atracción turística. Mientras tanto, la erupción habrá ido acercándose inexorablemente hacia su punto álgido o clímax. El escape de gases calientes habrá ido ensanchando la fisura original y la actividad habrá ido adquiriendo un ritmo cada vez mayor y más violento; encima del cráter empezarán a formarse grandes nubes de cenizas. Para los que vivan cerca del volcán, la erupción ya habrá por entonces alcanzado unas proporciones mucho mayores que las de "otro Paricutín". Las cenizas irán bloqueando paulatinamente las vías de comunicación; eso, unido a la rotura de los cables telefónicos y de electricidad, empezará a hacer surgir el pánico entre la población. Densas lluvias de cenizas caerán en los alrededores del volcán y en los lugares hacia los que las empuje el viento; simultáneamente, se desatarán grandes tormentas, con todo su acompañamiento de lluvias torrenciales y relámpagos cegadores, causadas por los movimientos convectivos de la nube eruptiva ascendente. Esta lluvia se mezclará con las cenizas acumuladas sobre el suelo, formando pastosas coladas de fango que se deslizarán por las vertientes del volcán La Primavera engullendo todo lo que se halle a su paso y haciendo inútiles todos los esfuerzos por salvar a posibles víctimas.

Cuando un volcán de estas características ha iniciado la fase violenta de su erupción, los acontecimientos pueden sucederse muy rápidamente y el clímax puede producirse en menos de 48 horas. La situación de confusión y caos que acabamos de describir no es aún la peor de las situaciones que la erupción originará; lo peor aún no habrá llegado; apenas si habrán comenzado unos hechos que podrán culminar con la total destrucción de la ciudad y de todos sus habitantes. A medida que el volcán vaya acercándose a su coletazo final, pueden irse produciendo grandes explosiones originadas por la vaporización instantánea de grandes volúmenes de aguas subterráneas. Quizás las lluvias torrenciales y las coladas de fango lleguen a rellenar el cráter, creando así un lago temporal que puede jugar un papel decisivo en la génesis de grandes eyecciones de componente horizontal a menudo asociadas con erupciones que se producen por debajo del nivel del agua; los bloques de piedra pómez proyectados por este tipo de explosiones quizás lleguen a constituir mantos de rocas flotantes, tal y como ya ha ocurrido en numerosas erupciones. Su elevado contenido en burbujas de gas hace que la piedra pómez sea tan ligera que puede flotar en el agua. Estas eyecciones horizontales, constituidas por suspensiones de rocas pulverizadas lubrificadas por gases a elevada temperatura, se desplazarán por los alrededores del volcán a velocidades huracanadas, quemando todo lo que encuentren a su paso y destruyendo casas y edificios con una pasmosa facilidad.

La columna eruptiva se estará elevando cada vez más, mandando las cenizas hasta 30 ó más kilómetros de altura; el persistente estruendo de las explosiones podrá ser oído en muchos kilómetros a la redonda; algunas explosiones más potentes incluso se oirán a varios cientos de kilómetros de distancia. El gran espesor que ya habrá alcanzado la capa de cenizas caídas dificultará el funcionamiento de las máquinas y los movimientos del hombre; cualquier intento de abandonar la zona en coche estará condenado de antemano al fracaso, ya que el grosor de la capa de cenizas impedirá conducir correctamente y el polvo volcánico no sólo bloqueará los respiraderos del motor, sino que reducirá enormemente la visibilidad. Cualquier intento por abandonar los automóviles y huir a pie implicaría exponerse a un peligro inmediato; las densas concentraciones de polvo pueden matar por asfixia y la caída de rocas puede matar por aplastamiento; la gente no estaría protegida contra ninguno de esos dos riesgos. Y aunque los coches pudiesen circular, no podrían ir a ninguna parte porque el inmenso caos circulatorio producido por el pánico que existiría se lo impediría; en estas condiciones, cualquier intento de evacuación fracasaría. Únicamente tendrían alguna posibilidad de escapar aquellos afortunados que viviesen en las afueras de la ciudad, lejos del volcán. El dramatismo de la situación haría que muchos se dirigiesen a las iglesias, a rogar a su dios que les librase de tan terrible muerte.

Mientras tanto, el volcán llegaría al último acto de la tragedia. A medida que la presión de los gases fuese disminuyendo, éstos serían incapaces de mantener en el aire los grandes volúmenes de cenizas y piedra pómez de la columna eruptiva, provocando la caída masiva de la misma; dicha caída originaría mortíferas eyecciones de componente horizontal; dentro de la chimenea, el volcán iría moliendo y mezclando los fragmentos de roca fundida o semi-fundida. Esta papilla de rocas sería expulsada bruscamente, convertida en una nube de gas ardiente altamente cargada de polvo rocoso incandescente y de gotitas de magma; la súbita expansión de esta nube de gas al salir del volcán hará que la misma empiece a deslizarse pendiente abajo a la velocidad de una onda de choque termonuclear pero aumentada del orden de varias magnitudes. A veces, la ira del volcán se aplaca antes de expulsar el mortal flujo piroclástico. La parte superior de la chimenea puede quedar bloqueada por un tapón de lava. Los supervivientes pueden interpretar esto como el final de la erupción, pero de hecho no es más que la calma que precede a una nueva tempestad; debajo del tapón de lava, la presión de los gases aumenta sin cesar. Quizás el tapón refrenará los ímpetus del volcán poniendo fin a la erupción. Esto es lo que ocurrió después de la última erupción del volcan Tequila, tan sólo unas pocas millas al norte. Si el tapón cede, tal y como ocurre muy a menudo, provocará la formación de

un flujo piroclástico extremadamente violento. Las nubes de la destrucción cubrirán los alrededores, destruyendo todo lo que hallen a su paso sobre muchas decenas de kilómetros. Muchos morirán instantáneamente, carbonizados o asfixiados, mientras que otros lo harán algo más tarde debido a las terribles quemaduras que habrán sufrido. No quedará ni rastro de la ciudad de Guadalajara y de muchos pueblos de los alrededores, como si hubieran sufrido el impacto de una bomba termonuclear. Incluso después de todo esto, no podrá decirse que la región sea de nuevo segura hasta que el último tapón o domo de lava que generalmente suele seguir a este tipo de actividad haya dejado de crecer.

Esto es sólo un ejemplo de lo que ocurrirá probablemente en las inmediaciones de uno de los mayores volcanes del mundo. En todo el mundo, el hombre trata de aprovechar las partes inferiores de las laderas de los volcanes; y, después de todo, ¿por qué no habría de ser así? El rico suelo volcánico es una invitación permanente para los agricultores y los ganaderos. Sin embargo, existe el peligro real de que volcanes actualmente tranquilos y de laderas fértiles vuelvan a entrar en erupción en el futuro. Puede decirse que los agricultores que insisten en cultivar las laderas de estos volcanes potencialmente asesinos están cavando, en el sentido literal de la expresión, sus propias tumbas.

VI. LOS CASQUETES DE HIELO: ¿GLACIACIÓN O FUSIÓN?

Y entonces llegaban juntas la niebla y la nieve,
y se desarrollaba un frío prodigioso:
y el hielo, con su alto mástil, llegaba flotando,
tan verde como la esmeralda.

Y a través de las corrientes de las cumbres nevadas
mandaba un lúgubre brillo:
ni huella del hombre ni animal conocido...

El hielo por doquier.
El hielo por aquí, el hielo por allá,
el hielo por todas partes:
y crujía, y gruñía, y rugía, y aullaba,
¡como los ecos de una blasfemia!

Samuel Taylor Coleridge, *Balada del Viejo Marinero*

"Al retumbar de las enormes olas rodando sobre la costa
la propia sal de la Tierra tiembla en sus sueños..."

Saint-John Perse

A partir del estudio del registro geológico se pueden efectuar dos predicciones ciertas: la primera es que el nivel del mar volverá a fluctuar unos centenares de metros sobre la tierra en un futuro relativamente próximo. El nivel del mar ha sufrido diversas oscilaciones, algunas de ellas de hasta 80 metros, en los últimos 30.000 años, es decir, desde que el hombre ha dejado huella de sus actividades en las pinturas rupestres en las cuevas; esos cambios del nivel mundial de los océanos se superponen a los movimientos

locales de subsidencia o alzamiento. La segunda es que los casquetes polares volverán a expanderse determinando la reinstauración de condiciones glaciares en regiones que actualmente no están sometidas a las mismas; los hielos volverán a cubrir gran parte del norte de América del Norte y del norte de Europa. La última vez en que tal cosa ocurrió a gran escala fue hace 18.000 años, mientras que la retirada de los hielos respecto a su último avance continental se produjo hace tan sólo 10.000 años. Por tanto, lo que el futuro deparará a muchos de los prósperos países industrializados de hoy en día será la congelación o la inundación. Lo único que no se sabe de cierto es cuál de las dos cosas va a ocurrir primero.

En capítulos anteriores ya hemos visto que, dentro de la escala de los tiempos geológicos, la actual distribución de tierras y mares es efímera. El registro geológico está lleno de grandes transgresiones oceánicas que invadieron los continentes, seguidas algo más tarde por alzamientos relativos y procesos de re-emergencia de esos fondos oceánicos someros que se convierten así en nuevas tierras emergidas. El baile de los continentes, y especialmente el nacimiento y muerte de puntos calientes y ascensos del manto, los procesos de expansión en las dorsales oceánicas, y la formación y cierre de grandes fosas oceánicas en los bordes de placa destructivos, están modificando continuamente los volúmenes relativos de las cuencas oceánicas. Esto hace, a su vez, que los antiguos núcleos estables de los continentes se sitúen alternativamente más altos o más bajos respecto al nivel mundial de los océanos. El proceso en su conjunto es enormemente complejo. Es posible que unas partes de un continente dado se vayan inundando mientras que otras partes del mismo continente se estén levantando lentamente, ya sea debido a la existencia de hinchamientos del manto subyacentes o como respuesta isostática a procesos de descarga o a causa de la presencia de cinturones de plegamiento originados por colisiones entre placas. Ciertas áreas continentales pueden estar caracterizadas por una subsidencia a largo plazo pero persistente, acentuada por el peso creciente de los sedimentos que tienden a acumularse en cualquier zona deprimida o cuenca sedimentaria. El Mar del Norte, entre Inglaterra y el continente europeo, es un área de este tipo. A estas variaciones *geotectónicas* de los niveles relativos del mar a escala local, regional y mundial se añade periódicamente la extracción de enormes volúmenes de agua oceánica que se incorpora a los grandes casquetes de hielo polares.

El hielo no está siempre presente en los polos. Cuando los dos polos están libres de hielos perpetuos, el clima de la Tierra deviene más cálido y homogéneo. Sin embargo, el registro geológico nos habla de la existencia de grandes edades de hielo en el pasado; cada una de ellas se caracterizó por la formación de grandes casquetes polares y por la aparición de glaciares en todas las grandes montañas, incluso en los trópicos. Las edades de hielo más antiguas son mal conocidas, pero existen bastantes datos acerca de los cuatro períodos glaciales más importantes que existieron, respectivamente, en el Precámbrico medio (hace unos 2.250 millones de años), en el Precámbrico terminal (entre 580 y 1.000 millones de años atrás, con complicados máximos a los 950 ± 50, 777 ± 40 y 616 ± 30 millones de años atrás), en el Permo-Carbonífero (entre 325 y 250 millones de años atrás), y en el Cuaternario (los últimos 2 millones de años).

¿Cuál es el origen de las edades de hielo? Claramente, una de las causas es la deriva de un continente o de un grupo de continentes a través del polo. Una de las razones por las que el continente antártico está cubierto actualmente por un grueso casquete de hielo es que él mismo, en el curso de su interminable baile alrededor del globo, está pasando actualmente una vez más sobre el Polo Sur. Si bien en el Polo Norte no hay ningún continente en la actualidad, el océano Ártico está rodeado por todos lados por tierras continentales cuya presencia determina que él mismo tenga muy pocas salidas; incluso en la mayor de ellas, la que da al Atlántico, la profundidad de las aguas es escasa en algunos puntos. Es muy probable que cuando no haya masas continentales cerca de ninguno de los dos polos como consecuencia de la deriva continental, se inhiba la formación de grandes casquetes helados; cuando esto ocurra, ambas regiones polares constituirán el centro de vastos océanos donde los hielos formados durante el invierno se fundirán al llegar el verano y no habrá ningún casquete con hielo permanente acumulado. Durante la gran edad de hielo del Permo-Carbonífero, el antiguo núcleo del Pangea (es decir, el grupo de continentes llamado Gondwana) estaba situado en el Polo Sur. En Sudamérica, Sudáfrica, la India, la Antártida y Australia existen extensas formaciones de *tillitas* (arcillas con gravas depositadas por el hielo) de esa edad. De hecho, se puede seguir la historia de todos estos continentes a medida que derivaban sobre el Polo Sur durante el Paleozoico. África del Norte estaba en el polo durante el Ordovícico, período del que datan las tillitas existentes en el Sahara. En el Devónico inferior Sudamérica se hallaba en el polo, mientras que a finales del Carbonífero el continente que se hallaba en esa posición era la Antártida. Durante el Pérmico, el grupo continental de Gondwana se desplazó rápidamente hacia el oeste, de manera que el Polo Sur se fue centrando progresivamente hacia Australia. Sin embargo, la extensión del casquete de hielo no permaneció siempre la misma, y entre finales del Carbonífero e inicios del Pérmico dicho casquete era mucho mayor de lo que había sido durante el Ordovícico. La presencia de masas continentales en los polos favorece el crecimiento de los casquetes de hielo, por lo que los continentes que deriven hacia los polos experimentarán condiciones

ambientales locales propias de las edades de hielo; sin embargo, la concatenación de todas estas circunstancias no basta para explicar el advenimiento de las cuatro grandes edades de hielo a que hemos hecho referencia anteriormente. Así, por ejemplo, durante la sucesión de grandes edades de hielo de finales del Precámbrico, las condiciones glaciales fueron tan intensas y extensas que prácticamente todos los continentes sufrieron sus efectos, incluidos los que se hallaban en aquellos momentos más alejados de los polos. Durante este período glacial, y aunque parezca chocante, la Antártida era uno de los pocos continentes libres de hielos. Tal y como ya hemos indicado, el máximo de la glaciación permo-carbonífera se produjo entre el Carbonífero final y el Pérmico inicial, época en que Gondwana había derivado hasta situarse encima del Polo Sur. Sin embargo, un poco antes del Triásico, y a pesar de que los bordes del supercontinente aún estaban muy cerca del polo, la glaciación terminó bruscamente. Por tanto, se deduce que la deriva continental, de indudable influencia sobre la zonación climática mundial, no es sino uno de los diversos factores que deben intervenir en la formación de grandes casquetes de hielo.

El otro factor principal que controla el crecimiento de los casquetes de hielo son los cambios en el balance de energía calórica entre la hidrosfera y la atmósfera. Este cambio en el balance energético puede ser indicado por cambios climáticos y meteorológicos. Evidentemente, la propia Tierra sólida es una fuente de calor que va siendo liberado hacia el espacio a través de los mares y la atmósfera. La cantidad de calor suministrada por la Tierra sólida ha ido experimentando una notable disminución a lo largo de su historia; la periodicidad con que se han ido sucediendo los grandes episodios de formación de minerales en la corteza sugiere la existencia de una ciclicidad a largo término en esta fuente de calor. Sin embargo, las mediciones efectuadas indican que la cantidad de energía diaria que llega a la Tierra procedente del Sol es unas 6.000 veces mayor que la cantidad de energía que alcanza la superficie procedente del interior de la Tierra; eso significa que el principal factor que influye sobre el balance energético de la atmósfera y la hidrosfera —y, por tanto, sobre el clima mundial— es la variación en el promedio anual de energía radiante procedente del Sol recibida por nuestro planeta, más que la del suministro del calor interno de la Tierra.

Durante mucho tiempo los científicos creyeron que la cantidad de energía suministrada por el Sol se mantenía prácticamente constante a lo largo del tiempo. Pero eso no es cierto. Cuidadosas observaciones acumuladas a lo largo de muchos años, juntamente con la correcta interpretación de los registros históricos, han permitido demostrar la existencia de fluctuaciones en el flujo energético solar; hay fluctuaciones tanto de ciclo corto como de ciclo largo. Actualmente sabemos que la presencia o ausencia de

grandes tormentas solares, llamadas "manchas solares", influye considerablemente sobre el flujo energético del Sol. La actividad de las manchas solares parece crecer y disminuir siguiendo ciclos de 11 años y también otros ciclos de mayor duración. Cuando no hay manchas solares, la energía radiante recibida por la Tierra disminuye extraordinariamente. La última vez en que la superficie del Sol estuvo completamente libre de manchas se produjo entre los años 1650 y 1700. A este período de recepción reducida de energía solar se le conoce con el nombre de "mínimo de Maunder"; él mismo conllevó el crecimiento de los casquetes de hielo polares y el deterioro generalizado del clima mundial. En Inglaterra, el Támesis se congeló durante muchos inviernos y la leche se helaba en los cubos. El máximo crecimiento de los casquetes de hielo se produjo con retraso respecto al mínimo de recepción de energía solar; dicho crecimiento de los hielos no alcanzó, por tanto, su punto álgido hasta el año 1750, aproximadamente, después del cual los hielos iniciaron nuevamente su retirada. El crecimiento de la superficie marina ocupada por los hielos durante esta "pequeña edad de hielo" de los siglos XVII y XVIII quizás puede explicar el fracaso de los repetidos intentos por hallar el "Paso del Noroeste" entre el Atlántico y el Pacífico efectuados entre 1.600 y 1.800; las condiciones climáticas y meteorológicas imperantes en el norte del Canadá durante esa época debían ser excesivamente árticas. Al parecer, el advenimiento de pequeñas edades de hielo comparables a la anteriormente citada se ha venido produciendo con una periodicidad cíclica aproximada de 2.000 años; se conocen ejemplos anteriores entre el año 0 y el 500 a.C., y alrededor del año 2000 a.C.

Las pequeñas fluctuaciones en el nivel de energía solar provocan la aparición de edades de hielo de magnitud aún menor, así como de cortos períodos de deterioro climático. Entre los ejemplos históricos de estos mini-avances glaciales cabe citar los siguientes: alrededor del año 1350 a.C., en el 750 a.C., en la Edad Media, y otros más recientes. En la isla ártica de Jan Mayen, por ejemplo, y después del avance que experimentaron alrededor del año 1750, los glaciares se han ido retirando paulatinamente, aunque con algunas recurrencias (años 1850/70, 1900/10 y 1950/55); sin embargo, cada nueva recurrencia, o avance relativo, era menor que la anterior. Este tipo de pequeñas fluctuaciones en el nivel de energía solar, evidenciadas por pequeñas edades de hielo de diferentes escalas y por los episodios intermedios de mejoramiento climático, ejercen una gran influencia sobre la distribución de los cinturones meteorológicos mundiales; debe tenerse presente que en ciertas áreas del globo estos pequeños cambios meteorológicos bastan para provocar sequías y/o períodos de hambre de nefastas consecuencias. Los veranos excepcionalmente tórridos de los años 764 y 783 trajeron sequía, hambre e incendios de ciudades que

afectaron grandemente a Gran Bretaña, Francia y Alemania; el sofocante calor reinante provocó la muerte de muchas personas. El siglo XIII es conocido por las cálidas condiciones ambientales y por el elevado nivel de los mares en todo el hemisferio norte. En Colorado, EE.UU., una sequía iniciada el año 1273, y que se prolongó por espacio de 12 años, diezmó a la población de Mesa Verde, obligando a emigrar a muchos indios de los terrenos de caza de sus antepasados.

No conocemos cuáles son las causas de las fluctuaciones a largo término en la recepción de energía solar, fluctuaciones que son las que determinan la existencia o no de edades de hielo de gran envergadura sobre la Tierra. En este sentido, se han hecho varias sugerencias; la mayoría de ellas contemplan el paso periódico del sistema solar a través de nubes de gas o polvo interestelares que son a veces barridas por el Sol. A la vez que es posible que la caída de estos materiales interestelares sobre la superficie del Sol provoque incrementos en el flujo de energía solar que se irradia hacia la Tierra, también es posible que este mismo proceso obstruya gravemente la recepción de energía solar por la Tierra. Lo que en ningún modo puede negarse es que, durante su largo viaje alrededor de la galaxia, el Sol puede encontrarse con considerables variaciones en la distribución de fragmentos, gas y polvo interestelares. La periodicidad a largo plazo de los intervalos cálidos y de las principales edades de hielo puede estar directamente relacionada con la rotación galáctica, o con el movimiento del sistema solar a través de los brazos espirales de nuestra galaxia ricos en meteoritos, polvo y gas, o incluso podría ser algo que ocurriese al azar; nuestros conocimientos actuales únicamente nos permiten especular acerca de las diferentes posibilidades.

La pregunta clave es: dado que de vez en cuando existen períodos de tiempo durante los cuales la recepción global de energía solar es sensiblemente diferente de la recepción normal, ¿se producen en la propia Tierra hechos que puedan convertir lo que en otras circunstancias no sería más que una tendencia hacia condiciones más glaciales en un episodio de gran avance de los hielos? Obviamente, la atmósfera, un auténtico filtro que permite el paso o rechaza la radiación solar, tiene en este aspecto una importancia primordial. Cuando está muy contaminada por polvo o vapores reflectivos, la cantidad de calor solar que se transmite se verá sensiblemente disminuida. Por ejemplo, se ha dicho que un importante y rápido incremento en el nivel de energía solar recibida podría provocar un considerable crecimiento de la cobertera nubosa en todo el mundo. La existencia de una espesa capa nubosa prácticamente continua que envolviese todo el globo constituiría, de hecho, una eficaz capa reflectiva que impediría que gran parte de la energía solar alcanzase la superficie de la Tierra.

La existencia de períodos glaciales o de edades de hielo también ha sido relacionada con las inversiones periódicas de la polaridad del campo magnético terrestre. Mientras esas inversiones se producen, el efecto protector de la *magnetosfera*, la envoltura magnética de la Tierra, se reduce extraordinariamente, dejando expuesta la superficie del planeta a un nivel de radiación cósmica mucho más alto. Esto haría que el grado de ionización a la altura de la *tropopausa* (el límite superior del nivel atmosférico en cuyo interior se desarrollan los procesos de circulación de las masas de aire, de formación de nubes y los fenómenos meteorológicos) se incrementase considerablemente, favoreciendo así la formación de una capa de cirros altamente reflectiva por nucleación.

Investigaciones recientes indican también la existencia de una relación entre ciertos avances glaciales y grandes erupciones volcánicas. A consecuencia de las grandes erupciones volcánicas explosivas, se incorporan a la atmósfera grandes cantidades de polvo de elevada reflectividad; estas concentraciones de polvo volcánico pueden permanecer en suspensión en la atmósfera durante años, hecho que determina una disminución global de las temperaturas debido al efecto de escudo que ejercen las citadas concentraciones de polvo. Durante esas fases de disminución global de las temperaturas, las grandes cantidades de nieve caídas durante el invierno contribuyen a incrementar aún más la reflectividad de la superficie de la Tierra (en proporciones de hasta un factor de cuatro), lo cual determina que las primaveras y los veranos sean aún más frescos de lo que correspondería. Se cree que esta combinación de circunstancias puede dar lugar a un exceso de hielos y, por tanto, a la expansión de la actividad glacial. El análisis de los datos históricos del continente sudamericano parece apoyar esta tesis. En 1835 se produjo una gran erupción pliniana en el volcán Coseguina, en Nicaragua, seguida de otras varias erupciones en el período 1843-46. A estas erupciones les sucedieron primaveras muy frías y veranos frescos; las cosechas se resintieron y en 1838 y 1839 hubo escasez de alimentos. En el período 1840-55 se produjeron notables avances glaciales. También en Sudamérica, en los Andes meridionales, importantes episodios de actividad volcánica en los períodos 5.450-4.700 y 2.350-2.150 años antes de la actualidad fueron seguidos por avances glaciales durante los períodos 5.260-4.590 y 2.940-2.100 años antes de la actualidad, respectivamente. Es evidente que si, como consecuencia del desarrollo de una capa reflectiva en los niveles superiores de la atmósfera, se cortase la recepción de energía solar en la superficie de la Tierra, el clima y la acumulación de hielo y nieve se verían afectados de forma creciente y acelerada. El resultado final de todo esto podría ser una "glaciación instantánea". Incluso después que la capa reflectiva se disipase, es probable que en las latitudes altas ya se hubiera

acumulado una cantidad crítica de hielo y nieve que aseguraría el carácter prácticamente perpetuo de la cobertera helada.

El hombre hizo su aparición en la Tierra inmediatamente antes del advenimiento de una de las principales edades de hielo: la primera reinstauración de condiciones glaciales extremas desde la época en que se fundieron los glaciares permocarboníferos, dejando la superficie de Gondwana libre de hielos, de ello hace unos 250 millones de años. Durante los últimos dos millones de años, nuestro planeta ha estado sometido a la helada presa de la glaciación cuaternaria. En el curso de la misma se han desarrollado grandes casquetes de hielo en los polos; en varias ocasiones —quizás unas 20— estos casquetes se han expandido mucho más allá de sus límites actuales. En el hemisferio norte, los mantos helados han cubierto gran parte de Norteamérica y Europa septentrional al menos en cuatro ocasiones. En el momento de su máximo avance, los hielos del Polo Norte iban desde Ucrania hasta el medio oeste americano. En Inglaterra llegaban hasta el sur de Londres. Muchos científicos están persuadidos de que la actual "gran edad de hielo" aún no ha terminado y de que ahora mismo estamos viviendo en un período interglacial situado entre dos períodos glaciales (los períodos *interglaciales* son los intervalos de tiempo durante los cuales el clima mejora y los hielos se retiran provisionalmente). En los depósitos de la edad de hielo cuaternaria están registrados muchos períodos interglaciales. En el mayor de ellos el clima era probablemente más cálido y uniforme que en nuestros días. Probablemente, cada interglacial (y los cortos *interestadiales*) tiene su propia serie de pequeñas glaciaciones y períodos cálidos intercalados. Por tanto, para el hombre moderno la pregunta fundamental es: ¿Cuándo acabará el actual período interglacial? El mismo empezó con la fusión generalizada y la desaparición de los mantos de hielo no polares hace unos 10.000 años. Entre los años 3500 y 3000 a.C. se produjo un óptimo climático, momento a partir del cual se han producido al menos tres bruscas deterioraciones del clima, así como otras muchas fluctuaciones de menor importancia. ¡Quizás la próxima deterioración climática anunciará el retorno de condiciones glaciales plenas! Una visión alternativa es la de aquellos que opinan, no sin tener serias dudas, que nos estamos acercando al punto medio del actual interglacial. Si eso es cierto, cabe pensar que el clima mundial va a ser en el próximo futuro más cálido aún y que los hielos polares van a retirarse aún más. No obstante, en ambos casos las consecuencias serán desastrosas; no podemos ignorar el hecho de que estamos viviendo en un período de equilibrio climático inestable situado dentro de una de las principales "edades de hielo" de la historia de la Tierra; en este contexto, una pequeña variación en el nivel de energía solar recibido en superficie podría bastar para que los hielos volviesen a adueñarse del hemisferio norte o, en el extremo opuesto, para que se fundiese gran parte de los hielos que existen en la actualidad en los casquetes polares.

Según una vieja leyenda noruega, el fin del mundo llegará cuando un verano quede bloqueado al no fundirse la nieve caída durante el invierno anterior. En 1783, la gigantesca erupción fisural de Laki, en Islandia, lanzó a la atmósfera cantidades ingentes de polvo. La atmósfera terrestre estuvo contaminada por este polvo hasta mucho tiempo después de la erupción. Para hacerse una idea del grado de contaminación existente basta citar un escrito de Benjamin Franklin, firmado en París aquel mismo año, en el que el famoso científico decía que toda Europa y Norteamérica estaban bajo una especie de capa de niebla que el Sol no podía penetrar y que, además, la nieve y el hielo del invierno precedente no se habían derretido del todo. Tal y como ya vimos en el capítulo 5, la contaminación atmosférica resultante de la erupción del Krakatoa en el año 1883 provocó una brusca caída en el nivel de energía radiante solar que alcanzaba la superficie de la Tierra (durante muchos meses se recibió entre un 10 y un 20 % menos de energía en lugares tan alejados de Krakatoa como, p. ej., Europa). El Laki debió ocasionar unos efectos de esta índole incluso mayores, pero, lamentablemente, no tenemos cifras que puedan servirnos de referencia. A comienzos del año 1977, los Estados Unidos fueron azotados por una serie de ventiscas de violencia inusitada, las cuales trajeron un empeoramiento tan serio de las condiciones ambientales que tuvo que declararse el estado de emergencia nacional. Las ciudades y las comunicaciones quedaron totalmente paralizadas, la gente era incapaz de llegar a sus lugares de trabajo; se aconsejó a la gente que no saliera de sus casas dado que en el exterior la ventisca soplaba a 80-100 kilómetros por hora y la temperatura era de hasta –50 °C. Muchos pueblos y ciudades quedaron incomunicados, miles de coches —algunos con sus ocupantes dentro— enterrados bajo la nieve, y centenares de personas perdieron sus vidas. Si hubiese ocurrido algo capaz de evitar la fusión de la gran cantidad de nieve acumulada (como, por ejemplo, varias grandes erupciones volcánicas), quizás ahora estaríamos todos convencidos de que nos estamos acercando a una nueva edad de hielo a pasos agigantados.

Las glaciaciones se desarrollan con gran rapidez. La vieja idea de que los glaciares van progresando lenta pero inexorablemente hacia el sur, cubriendo poco a poco todo el hemisferio norte, parece no ajustarse a la realidad; según los descubrimientos más recientes, parece altamente probable que las edades de hielo comiencen muy rápidamente (hipótesis catastrofista) y que la nieve y el hielo existentes en un lugar dado no estén allí como consecuencia de un presunto avance procedente del norte sino que ya se hayan acumulado directamente en el lugar en que se encuentran. Los

glaciares no llegan arrastrándose desde el norte; lo que en realidad ocurre es que diferentes campos de hielo y nieve van agrupándose hasta originar una área glacial "instantánea". Si durante el invierno se produjesen repetidas nevadas que dejasen sobre el suelo medio metro o más de nieve, y si esa nieve no se derritiese totalmente durante el verano siguiente, tendría un efecto devastador, y al cabo de unos pocos años toda Europa y Norteamérica se habrían convertido en un inmenso y desolado desierto helado bajo una capa de nieve creciendo incesantemente.

A medida que el espesor de la nieve va aumentando, su propio peso la va comprimiendo hasta convertirla en una matriz granular llamada *névé* o *firn*; si el espesor de la nieve y la presión aumentan aún más, este nevé acaba transformándose en hielo. Cuando una gran masa de hielo alcanza cierto espesor, la presión en el centro hace que la misma fluya hacia los lados; ésta es la razón por la cual los casquetes de hielo polares tienen un espesor más o menos constante. Aunque el hielo parece fluir como un material plástico, el mecanismo real es mucho más complicado: la intensa presión ejercida por la gruesa capa de hielo suprayacente hace que los bordes de cada uno de los cristales de hielo que constituyen el casquete se fundan, formándose una delgada película de agua alrededor de cada cristal. Esta agua desempeña un papel lubrificante y permite que unos cristales se deslicen fácilmente sobre otros. Cuando la presión cesa, esta agua vuelve a congelarse, convirtiéndose de nuevo en hielo. De esta manera, grandes masas de hielo glaciar pueden desplazarse sobre distancias considerables.

La atmósfera ha estado operando así desde que aparecieron los primeros gases resultantes del enfriamiento de la Tierra y de que tales gases empezaron a circular en respuesta a las transferencias de calor entre diferentes regiones del globo. La atmósfera es el medio "fluido" que controla en gran medida el balance calórico de nuestro planeta; es asimismo la responsable del funcionamiento climático, diario y a más largo plazo, de la Tierra. A través de su respuesta en relación con la radiación solar que recibe, controla la extensión de los hielos y los desiertos, así como la anegación por mares y océanos en ascenso como consecuencia directa de la fusión del agua dulce de los casquetes polares. Pero ¿cuándo apareció la atmósfera tal y como la conocemos hoy en día?

Después de su creación, hace unos 4.600 millones de años, la historia primitiva de la Tierra no es más que un bombardeo incesante de planetesimales. La combinación de diversos procesos pudo haber causado la fusión parcial o total de la cálida proto-Tierra. De cualquier modo, a medida que la Tierra iba enfriándose y, por tanto, contrayéndose, estos hechos determinaron que los componentes más ligeros escapasen en forma de grandes volúmenes de vapor de agua, dióxido de carbono, amoníaco, metano y otros gases. Muy probablemente, la actividad volcánica jugó un papel determinante en la liberación de estos componentes gaseosos. El posterior y más acusado enfriamiento determinó que ciertos componentes de esta mezcla gaseosa que era la primitiva se condensasen y dieran lugar a las primeras nubes. Pero el enfriamiento no se detuvo ahí, sino que continuó, provocando la condensación del vapor de agua que primero se convirtió en nubes y después en agua líquida; esta agua empezó a caer en forma de lluvia sobre la relativamente caliente superficie de la Tierra primitiva. La mayor parte de esta lluvia, o solución de gases, se vaporizaba de nuevo tan pronto como tocaba la superficie caliente de nuestro planeta; sin embargo, llegó un momento en que la superficie de la Tierra ya estaba lo bastante fría como para permitir la formación de cursos de agua permanentes, que son los que determinaron la aparición de los primeros océanos en las principales depresiones del planeta. Incluso hoy en día, gran cantidad de gases y vapor de agua escapan hacia la atmósfera cada vez que se produce una erupción volcánica, y la lluvia sigue siendo una solución de gases (por esta razón, las plantas regadas con agua de lluvia crecen mejor que las que se riegan con agua del grifo). Sin embargo, tan sólo una parte del agua y de los gases liberados por las erupciones volcánicas tiene un carácter primario, ya que el resto es agua subterránea reciclada y agua que quedó atrapada en sedimentos antiguos de la corteza terrestre.

Después de la formación de la primera atmósfera, los gases más ligeros (como el hidrógeno y el helio) escaparon hacia el espacio —o fueron arrastrados por el viento solar—; después de que eso ocurriese, la atmósfera terrestre estaba constituida por una mezcla de vapor de agua, metano, amoníaco y formaldehído. El continuo bombardeo de radiaciones ultravioletas a que estaban sometidas rompió esas moléculas; su lugar fue en parte ocupado por los productos resultantes de tal proceso de fraccionamiento: hidrógeno, nitrógeno, dióxido de carbono y agua. El hidrógeno recién formado escapó una vez más hacia el espacio, por lo que la atmósfera primitiva se fue enriqueciendo gradualmente en nitrógeno y dióxido de carbono. Las primeras macromoléculas de proteinoides pudieron haberse formado en esa primitiva atmósfera debido a uno de los tres mecanismos siguientes: 1) descargas eléctricas producidas en el curso de violentas tormentas; 2) soluciones de gases en el agua de lluvia que caía sobre la lava ardiente; 3) ondas acústicas de choque pasando a través de las nubes durante erupciones volcánicas altamente explosivas. Una propuesta alternativa a estos tres mecanismos es la formulada por Sir Fred Hoyle y N. C. Wickramasinghe, según los cuales la vida pudo haber llegado a la Tierra procedente del espacio interestelar, transportada a nuestro planeta por un meteorito. Sea

cual sea el verdadero origen de la vida, una vez hubo aparecido la creación inicial de la vida sobre la Tierra, las plantas primitivas pudieron desarrollarse en las fuentes y pozas de agua caliente normalmente asociadas con la actividad volcánica residual y colonizar los crecientes océanos. A partir de aquel momento, y hasta nuestros días, empezó a aumentar incesantemente la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera; ello fue debido a la reducción del exceso de dióxido de carbono asociada con una reacción biológica que se produce en el interior de las plantas vivientes; así, hoy en día, el nitrógeno y el oxígeno constituyen el 98 % de los gases del aire. En esta cifra no se incluye el vapor de agua, cuya proporción varía en función de la temperatura ambiental y de la disponibilidad de agua.

El clima es el resultado de la interacción entre la circulación de las aguas oceánicas y los incesantes movimientos de la mezcla gaseosa a la que llamamos atmósfera. La radiación solar proporciona la energía necesaria para mover esta gigantesca máquina climática. La cantidad de calor solar que recibe un punto dado de la Tierra, y la columna de atmósfera que se halla por encima del mismo, depende de una serie de variables, de entre las cuales las más importantes son la disposición de la Tierra respecto al Sol (p. ej., su posición estacional y su cabeceo periódico) y la distancia entre la Tierra y la fuente de calor y energía vital.

El eje de la Tierra oscila entre 22° y 24° cada 40.000 años respecto a su órbita elíptica alrededor del Sol. Esto influye sobre las estaciones; la excentricidad de la órbita determina hasta un 30 % de cambio estacional en la intensidad de radiación solar recibida en un punto dado de la Tierra. En la actualidad, el hemisferio norte está experimentando un 6,75 % de cambio estacional. Las complejas interrelaciones entre estos factores determinaron un cambio estacional de gran importancia hace unos 10.000 años, a finales del último período glacial en el hemisferio norte. A medida que va girando alrededor del Sol, siguiendo su trayectoria elíptica, la Tierra tiende a "cabecear" o "bambolearse" respecto a su eje; este cabeceo es debido a un conjunto de factores entre los que cabe citar la atracción gravitatoria ejercida por el Sol y la Luna sobre un planeta, la Tierra, que no es perfectamente esférico. La falsa impresión de que las constelaciones de estrellas que vemos sobre nuestras cabezas han ido girando a lo largo de la historia se debe precisamente al cabeceo de la Tierra. Este cabeceo o bamboleo sigue un modelo regular, llamado precisión, que se repite cada 25.800 años aproximadamente. Existe otro tipo de bamboleo, de mucha menor importancia, causado por el movimiento orbital de la Luna alrededor de la Tierra, pues debido a la forma achatada de la Tierra con su abultamiento alrededor del ecuador hace que ésta se bambolee según un modelo nodal regular que se repite cada 18 años más o menos.

Todas estas variaciones interesan especialmente a los astrónomos, pero las mismas tienen un efecto a corto plazo que puede ser significativo de cara a nuestra concepción de la Tierra como un todo. Nos estamos refiriendo al "bamboleo de Chandler", cuyo nombre es debido a un científico aficionado americano que fue quien lo describió por primera vez en 1891. La característica principal del bamboleo de Chandler es un pequeño cambio regular en la dirección del eje de rotación de la Tierra que tarda 14 meses en producirse; una vez dicho cambio se ha producido, sus efectos van desapareciendo paulatinamente a lo largo de un período de 10 a 30 años. El estímulo inicial que origina el bamboleo ha sido motivo de controversia desde que el mismo fue descubierto; entre las causas principales que se han ido proponiendo a lo largo del tiempo cabe citar posibles movimientos atmosféricos a gran escala: amontonamiento gravitacional de masas de aire en ciertas zonas de la superficie del globo que provocasen variaciones en las oscilaciones del eje, interacciones complejas entre el núcleo y el manto terrestres y, especialmente, los terremotos. La magnitud física de los principales terremotos ha sido medida muy detalladamente con instrumentos de precisión; la combinación de los datos así obtenidos con las más recientes informaciones acerca de los movimientos corticales causados por la tectónica de placas hace que sea posible calcular los efectos acumulativos de los grandes terremotos sobre el movimiento polar (o sea, el pequeño cambio de dirección del eje de rotación que constituye el bamboleo de Chandler).

El estudio de los principales terremotos ocurridos durante este siglo ha permitido demostrar la existencia de una estrecha correlación entre el modelo global de sismicidad y las variaciones del bamboleo de Chandler a lo largo del mismo período de tiempo. Sin embargo, el efecto de cualquier terremoto individualmente considerado, por grande que éste sea, es demasiado pequeño para poder ser detectado; es el efecto acumulativo de un gran número de terremotos lo que parece influir sobre la variación. Otro factor, que puede tener una importancia parecida, es el movimiento asísmico a lo largo de los bordes de placas en las profundidades de la corteza —este movimiento no está directamente relacionado con los terremotos, por lo que es muy difícil de medir. Parece cierto que los grandes terremotos pueden explicar por sí solos gran parte del mecanismo que determina la aparición ocasional del bamboleo; también permiten explicar las variaciones a largo plazo de su amplitud. El resto podría ser debido a diferentes factores, tales como los movimientos a gran escala de la atmósfera terrestre. Durante los últimos 70 años, el modelo del bamboleo de Chandler ha experimentado un máximo de amplitud en 1910; la amplitud fue decreciendo hasta el año 1920, manteniéndose en un nivel muy bajo hasta el año 1940.

En ese momento comenzó a aumentar, alcanzando un nuevo máximo en 1954, momento a partir del cual su amplitud ha ido disminuyendo de forma irregular. En la actualidad da la impresión de que los grandes terremotos son tan efectivos en amortiguar el cabeceo como en excitarlo; la disminución del bamboleo entre 1914 y 1929 coincide con un período en el que se produjeron varios grandes terremotos.

La mayor parte del calor solar que llega a las capas más externas de nuestra atmósfera es reflejado, dispersado y absorbido antes de que alcance la superficie de la Tierra. Del total de calor solar que llega a la Tierra, sólo entre el 43 y el 48 % alcanza realmente la superficie del planeta de manera que pueda ser absorbido en forma de radiaciones de onda corta por el suelo y los océanos, donde puede transmitirse hasta profundidades considerables. Alrededor de la mitad de esta energía solar alcanza el suelo directamente a través de la atmósfera; el resto llega indirectamente a la superficie después de haber sido dispersado y difundido por las nubes y por las capas de vapor de agua. Alrededor del 16 al 18 % de la radiación incidente se pierde al ser absorbida en la estratosfera y en la troposfera, mientras que hasta un tercio de la radiación que alcanza las capas exteriores de la Tierra es reflejado de nuevo hacia el espacio. Naturalmente, estos valores se aplican únicamente a la radiación solar recibida durante el día. La mayor parte del calor realmente absorbido por la atmósfera procede de la re-irradiación de energía solar en forma de ondas largas desde la superficie de la Tierra. Esta radiación energética procedente del suelo o de la superficie de las aguas puede ser, a su vez, reflejada y re-irradiada de nuevo hacia la superficie de la Tierra, especialmente durante los intervalos de elevada nubosidad (en condiciones óptimas puede ser retornada hasta el 80 % de la energía radiante procedente de la superficie de la Tierra). Por esa razón las noches claras son mucho más frías que las nubosas, incluso durante el verano o en el desierto; aunque la atmósfera mitiga la pérdida inmediata de calor radiante, cuando la capa de nubes aislante está ausente, la cantidad de calor perdida es mucho mayor.

El porcentaje de radiación solar absorbida en un lugar determinado depende de la reflectividad de los materiales allí existentes (de su *albedo*). Por tanto, mientras que los suelos oscuros y otros sedimentos semejantes con un bajo albedo reflejan sólo entre un 7 y un 20 % de la radiación que reciben, el hielo y la nieve, que tienen un albedo muy elevado, reflejan hasta el 90 % de la radiación. Las altas latitudes de las regiones polares reciben menos calor solar debido a que antes de alcanzar la superficie, la radiación debe seguir una trayectoria más oblicua a través de la atmósfera y de las capas de nubes; por ese motivo, el flujo energético que se dirige hacia tales latitudes está sujeto a mayores pérdidas por absorción. La cantidad de radiación que en un momento dado puede atravesar la atmósfera depende del contenido fluctuante de humedad atmosférica y de la densidad de la cobertera nubosa, y también de las concentraciones de dióxido de carbono y de polvo volcánico. Un incremento en la concentración de dióxido de carbono acentúa la capacidad de filtraje del mismo, hecho que dificulta que la radiación solar llegue a la superficie de la Tierra al tiempo que evita que parte del calor re-irradiado por la Tierra se pierda en el espacio. Cualquier combinación adversa de estos factores podría influir gravemente sobre el clima mundial y desencadenar un cambio climático de imprevisibles consecuencias.

El desigual calentamiento de las diferentes partes de la superficie terrestre hace que existan importantes diferencias en la densidad de las capas atmosféricas más próximas a la superficie de la Tierra. Las masas de aire con diferentes densidades tienden a circular hasta que alcanzan una posición de equilibrio o hasta que su temperatura varíe lo bastante como para establecer una relación de densidades distinta. El aire cálido es menos denso y tiende a ascender y a expanderse por encima de las masas de aire relativamente más frías y densas; estas masas frías tienden a hundirse y a expanderse por debajo del aire cálido ascendente. El mayor calentamiento permanente de las regiones ecuatoriales se ve muy afectado por la existencia de los casquetes de hielo polares. Las zonas ecuatoriales, que reciben dos veces más calor por año que los polos, gastan parte de ese calor en impulsar una circulación atmosférica que va desde el ecuador hacia los polos. Esto determina el notable grado de permanencia de las zonas climáticas paralelas a los círculos latitudinales. La atmósfera es como una gigantesca máquina térmica que mueve a las masas de aire, las cuales, en su movimiento, deben superar la resistencia (fricción) que les ofrecen las irregularidades geográficas; esta máquina fantástica también transfiere calor desde las cálidas regiones ecuatoriales hasta las frías capas de la atmósfera superior, en las que la cantidad de calor perdida por irradiación hacia el espacio exterior es mayor que la ganada por la absorción de energía radiante procedente tanto del Sol como de la propia Tierra. Si la fuente de radiación solar se parase bruscamente, toda la circulación atmosférica quedaría rápidamente inmovilizada.

El cálido aire ecuatorial (el "ecuador atmosférico" no coincide con el ecuador geográfico) asciende hasta los trópicos a través de un estrecho pasillo llamado "zona de convergencia intertropical"; este hecho determina la existencia de un gradiente de presión entre la cálida zona ecuatorial y las frías regiones polares. Muy a grandes rasgos, esto significa que el aire cálido y ligero se dirige en dirección a los polos hacia las altas latitudes, mientras que su lugar en las latitudes bajas es ocupado por aire relativamente más

frío y denso procedente de las regiones polares. La rotación de la Tierra respecto a la atmósfera que la envuelve hace que en ésta se produzcan unos movimientos a los que denominamos viento. En las regiones ecuatoriales, esta rotación desvía también las corrientes de aire hacia el oeste, lo cual determina la existencia de un movimiento en sentido horario (hacia la derecha) alrededor de los centros de altas presiones en el hemisferio norte y en sentido antihorario (hacia la izquierda) en el hemisferio sur. En los centros de bajas presiones ocurre lo contrario.

El rasgo principal de la circulación atmosférica es el predominio de las altas corrientes en chorro del oeste, que alcanzan su máxima intensidad en las latitudes medias; en las latitudes altas forman giros circumpolares estables situados entre un kilómetro de altura y los niveles estratosféricos. Estos giros controlan el modelo climático de las regiones situadas entre los 30° y los 60° de latitud, aunque ocasionalmente su influencia puede llegar hasta el ecuador. En definitiva, son los responsables del clima que experimentamos en la Tierra.

Los huracanes, o ciclones tropicales, se originan probablemente a partir de ondas en el flujo de aire tropical del este, especialmente cuando la atmósfera se halla en situación inestable a la altura de la corriente en chorro subtropical del oeste. Su fuente de energía es el agua de los océanos, la cual al evaporarse convierte el calor latente en energía cinética y auténtico calor que se eleva en espiral con gran rapidez alrededor de una columna central, u ojo, relativamente tranquila y por la que desciende el aire frío estratosférico. Los vientos giran, espiralados, alrededor del ojo, en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido antihorario en el sur; estos vientos transfieren a las frías capas de la atmósfera superior el calor originario de la superficie del mar, proceso durante el cual se desarrollan sistemas tormentosos de 80 a 800 kilómetros de diámetro que giran con gran rapidez. En la parte superior del ojo de un huracán las espirales de aire ascendentes giran en sentido opuesto al que lo hacían mientras ascendían y el vapor de agua se condensa dando lugar a la aparición de un techo de cirros a la altura de la estratosfera. Por tanto, es obvio que los huracanes necesitan el calor y la evaporación de los océanos para formarse y mantenerse; cuando pasan sobre tierra firme, mueren rápidamente. Sin embargo, el arrastre friccional de la superficie de la Tierra hace que la espiral se cierre sobre sí misma con mayor velocidad y que los vientos giren más rápidamente (de la misma manera que un patinador sobre hielo incrementa su velocidad de rotación cuando aproxima los brazos al cuerpo); esto provoca que los huracanes alcancen su máxima peligrosidad inmediatamente después de situarse sobre tierra firme.

En 1969, el huracán Hanna azotó Galveston, en Texas, y en tres días

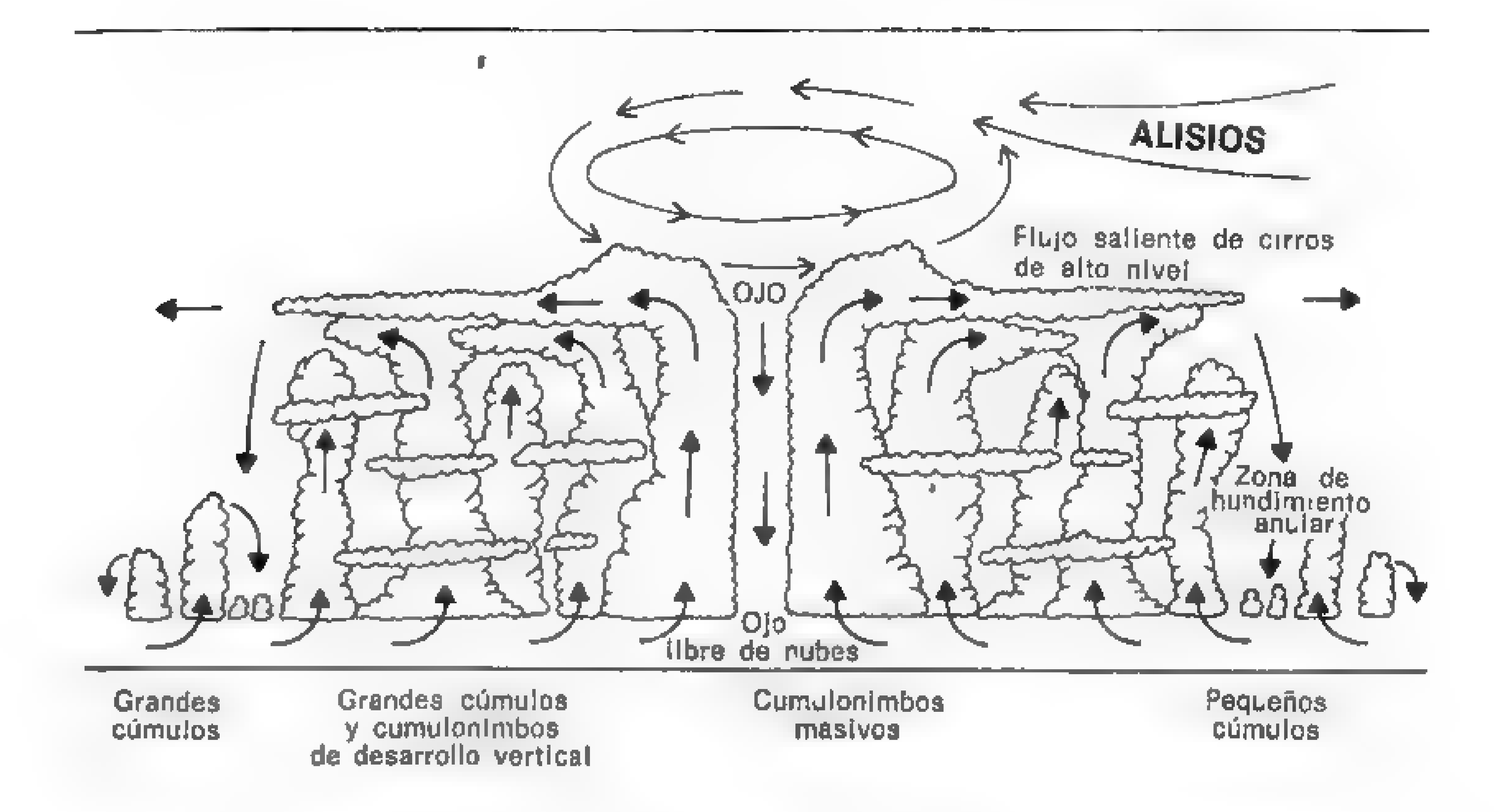


Fig. 25. Corte esquemático de un huracán en el que pueden observarse las direcciones del viento y el desarrollo de diferentes tipos de nubes. Al nivel del suelo, la velocidad del viento va aumentando hacia el centro del vértice hasta alcanzar velocidades de más de 150 kilómetros por hora. Las fuertes corrientes ascendentes alrededor del núcleo dan lugar a la formación de inmensas columnas de cumulonimbos tormentosos, mientras que por el interior del núcleo relativamente tranquilo circula un flujo de aire descendente.

causó gran cantidad de daños materiales y pérdidas de vidas humanas. El segundo día de la tormenta, el mar, sometido a la terrible furia de los vientos huracanados, destrozó el rompeolas e invadió el centro de la ciudad. Todo el frente portuario de la ciudad quedó convertido en un caos total al ir a romper repetidamente en la costa olas de hasta 30 metros de altura. La playa y el mar estaban cubiertos de restos de origen diverso, algunos procedentes del dique destruido por la furia de las olas y otros de las embarcaciones y barracas de la orilla de la costa. Para poder hacer un balance de la situación tuvo que esperarse a que Hanna se hubiese calmado. Los daños se extendían hasta donde la vista podía alcanzar, barrios enteros de casas habían sido aplastados como cajas de cerillas, había gente desorientada buscando a sus familiares, otros lo habían perdido casi todo y llevaban sobre sus espaldas o en los brazos lo poco que les quedaba. La gente del área afectada se congregó en los comedores de beneficencia, y se habilitaron cantinas móviles especiales para dar a los niños lo que en muchos casos iba a ser su primera comida en varios días. El ejército puso en juego sus vehículos anfibios, y toda clase de vehículos sin los cuales la distribución de

medicinas y alimentos de los puestos de socorro se habría visto gravemente dificultada. Durante la embestida del huracán Hanna ocurrieron algunas cosas curiosas: un tablón de 5 × 30 cm quedó empotrado en un árbol sin romperse, y las inundaciones hicieron que las serpientes venenosas buscasen refugio en los suburbios de la ciudad. Las víboras de agua y las serpientes de cascabel se refugiaron en las terrazas y galerías, donde se convirtieron en un peligro potencial.

Las grandes cadenas montañosas de Norteamérica, el norte de Europa y Asia constituyen unas barreras geográficas que a través de la fricción que originan pueden producir un efecto de frenado y desviar las altas corrientes de aire del oeste. En cambio, en el hemisferio sur, en donde el 80 % de su superficie está cubierta por el océano, existe muy poca fricción, por lo que el relieve terrestre ejerce una influencia muy débil sobre la circulación en las altas capas atmosféricas, limitándose a asegurar la estabilidad del giro circumpolar meridional. La circulación general entre la zona ecuatorial y las zonas polares se produce a través de una serie de células atmosféricas interconectadas, cada una de las cuales tiene su propio modelo de circulación interna, el cual, por otra parte, puede variar de una estación a otra. Es precisamente la ubicación, el tamaño y el vigor de esas células lo que controla el clima y el avance o retroceso de los casquetes de hielo; sin embargo, estas características están controladas, a su vez, por procesos más complejos que se producen en nuestra turbulenta atmósfera. Entre las latitudes 30° Norte y 30° Sur existen dos células de Hadley, una a cada lado del ecuador. Ambas convergen en el ecuador, donde forman la zona de convergencia intertropical (ZCI o ICZ); en esta zona tienen lugar grandes subidas de aire cálido y húmedo debido al calentamiento superficial del mismo en los alisios del noroeste y del sudeste. Cuando estas masas ascendentes de aire húmedo y caliente llegan a las frías regiones de la atmósfera superior, se convierten en altísimas formaciones de cumulonimbos cargados de

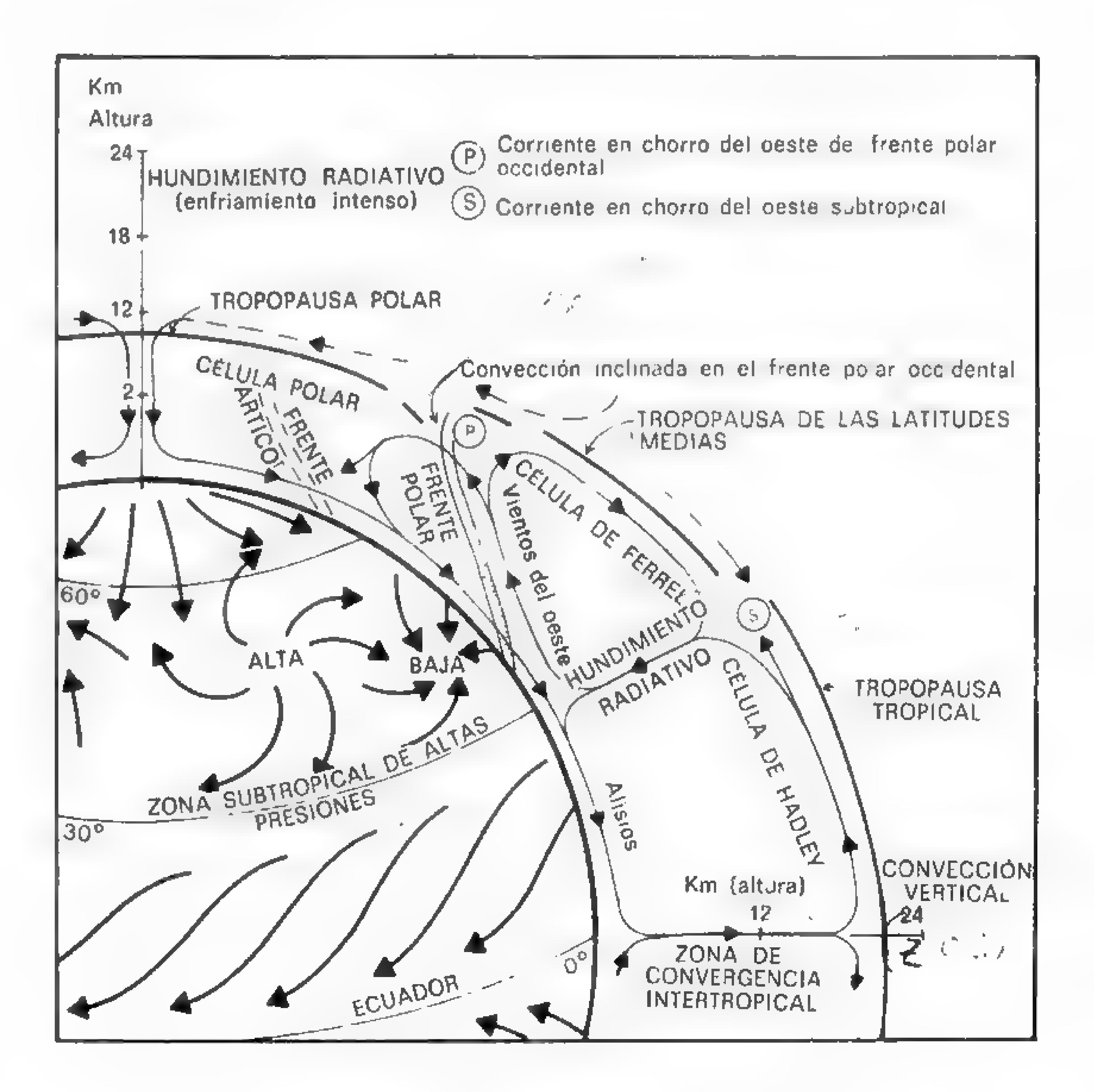


Fig. 26. Corte esquemático de la máquina climática terrestre en un sector del ▶ hemisferio septentrional. Las trayectorias de las principales corrientes de aire muestran claramente las interrelaciones entre las diferentes zonas climáticas de la Tierra. En las regiones ecuatoriales el aire húmedo asciende rápidamente a lo largo de la zona de convergencia intertropical hasta alcanzar las frías regiones de la atmósfera superior. El enfriamiento subsiguiente del aire en esta zona de convección vertical provoca la formación de masas de cumulonimbos tormentosos, responsables de la elevada pluviosidad propia de las regiones tropicales. El aire, ya seco, de la célula de Hadley circula por debajo de la tropopausa tropical hasta encontrarse con una corriente similar procedente de la célula de Ferrel; las frías corrientes resultantes experimentan un hundimiento radiativo y originan la zona subtropical de altas presiones. Las corrientes de aire se separan en este punto; una fluye hacia el sur convertida en los vientos alisios, mientras que la otra fluye hacia el norte convertida en los vientos del oeste. El efecto de Coriolis debido a la rotación de la Tierra desvía estas corrientes de aire en dirección opuesta a la de la rotación terrestre.

El frente polar está originado por la cuña de aire frío de la célula polar situada por debajo del extremo septentrional de las cálidas masas de aire de la célula de Ferrel. El aire caliente asciende resbalando sobre la cuña fría a lo largo de una zona de perturbados vientos del oeste delimitada por una alternancia de anticiclones y ciclones de altas y bajas presiones; la situación de esta zona de ciclones y anticiclones depende de la posición de la corriente en chorro del oeste del frente polar. Las complejas trayectorias de las corrientes de aire asociadas con el frente polar son las responsables de las veleidades del clima en el hemisferio septentrional. El frente ártico (y el frente antártico correspondiente) delinea el contacto entre el flujo de aire polar intensamente enfriado y la cuña meridional disturbada de la célula polar (en el hemisferio sur las direcciones están, por supuesto, invertidas).

electricidad. Cuando alcanzan una altura de entre 15 y 20 kilómetros, las corrientes de aire de las células de Hadley se desvían la una respecto a la otra y se desplazan diagonalmente en dirección a los polos; por su superficie superior, situada a la altura de la tropopausa tropical, pierden continuamente calor. Aproximadamente a los 30° de latitud, los altos flujos de aire de las células de Hadley chocan con los flujos de aire de las células de Ferrel, emplazadas sobre las latitudes medias; en lo alto de estas células la circulación se dirige hacia las zonas ecuatoriales. Esta confluencia origina las corrientes en chorro subtropicales del oeste, las cuales soplan con fuerza huracanada a unos 13-14 kilómetros de altura; esta convergencia también origina el hundimiento de las masas de aire frío hacia la superficie de la Tierra. El flujo de aire descendente genera una zona estable de altas presiones llamada la zona de altas presiones subtropical o, simplemente, el alto subtropical; en esta zona las precipitaciones son muy escasas. En los niveles inferiores, este flujo de aire viaja a través de las células de Hadley, en dirección al ecuador, convertido en los vientos alisios, y a través de las células de Ferrel, en dirección a los polos, convertido en los vientos del oeste. A los 60° de latitud, las células de Ferrel chocan contra las células polares en una zona de circulación muy compleja hacia la que convergen los vientos del oeste perturbados y las corrientes en chorro del frente polar del oeste, todo ello a lo largo de un frente polar inclinado situado encima de la zona de los ciclones y anticiclones extratropicales. La altura del techo de la célula de Ferrel (llamado tropopausa subtropical) disminuye en dirección al frente polar, pasando de unos 15 kilómetros a tan sólo 10 kilómetros, aproximadamente. Las células de Hadley y Ferrel forman conjuntamente una cuña de aire caliente que se desplaza hacia los polos a lo largo del inclinado frente polar y por encima de la correspondiente cuña de aire frío de la célula polar, la cual se hunde en dirección al ecuador, Cada célula polar está subdividida parcialmente por otro frente, el ártico en el hemisferio norte, y el antártico en el hemisferio sur; estos frentes separan los vientos del oeste perturbados del flujo de aire polar a lo largo de unos 9 kilómetros por encima de los polos; el flujo de aire polar gira en espiral después de haber sido intensamente enfriado a través de un proceso de hundimiento radiactivo. Los grandes giros de aire de la superficie de la Tierra están relacionados con las corrientes en chorro, y son los que determinan las características climáticas de las tempestuosas regiones templadas en las que están situados la mayoría de los países industrializados. Los cambios en las trayectorias de las corrientes en chorro pueden provocar variaciones muy importantes en el clima de estos países.

Los océanos son el segundo medio en importancia en el control del clima; el agua puede retener el calor absorbido durante mucho más tiempo

que la atmósfera e influye de manera significativa sobre la temperatura del aire situado directamente encima de los océanos. No obstante, la temperatura del aire influye a su vez sobre la temperatura de las aguas. El efecto inmediato de los vientos que soplan encima de los océanos es el de poner en movimiento las capas de agua más superficiales, estableciendo así un modelo de circulación al que también contribuyen los movimientos verticales entre masas de agua con densidades y temperaturas distintas. La circulación oceánica está afectada por la rotación de la Tierra de manera similar a como lo está nuestra atmósfera, ya que, al girar, nuestro planeta desvía las aguas de los océanos en dirección opuesta a la de su rotación, originando un abombamiento hidrostático en la región de altas presiones subtropical, cerca de la latitud 30°. Existe una condición de equilibrio entre el flujo saliente de este abombamiento de agua y la deflección causada por la rotación de la Tierra. Estando, pues, anulado de este modo el efecto de giro, los principales movimientos circulatorios de los océanos generalmente son un reflejo de los movimientos de los vientos dominantes.

Los océanos absorben cantidades ingentes de calor solar, y a pesar de que buena parte de este calor se dispersa, aún queda en ellos una cantidad suficiente de él como para influir de manera muy importante sobre nuestro clima. Por ejemplo, la corriente del Golfo cruza todo el Atlántico Norte llevando agua cálida desde las Antillas y Florida hasta las costas de Irlanda y Escocia, arrastrando consigo una flora típica de latitudes mucho más meridionales. Estas corrientes oceánicas pueden generar sucesiones de altos y bajos térmicos que se superponen al modelo atmosférico general de la Tierra. Los efectos de estas corrientes oceánicas serán más notables cuanto mayor sea la diferencia térmica entre los polos y el ecuador, y más reducidos cuanto menor sea esa diferencia térmica. La circulación de los océanos se ve incrementada por los flujos fríos de agua polar derretida que se dirige hacia regiones más cálidas, equilibrando el flujo hacia el norte de las aguas superficiales más cálidas.

El clima mundial depende de la cantidad de calor que la Tierra recibe del Sol, y su estabilidad está asegurada por el precario equilibrio existente entre el filtro atmosférico, la capacidad reflectiva terrestre y por el potencial de absorción de ambos. Pero aquí topamos una vez más con el eterno dilema del huevo y la gallina. La cantidad de calor solar que llega a la superficie de la Tierra en un punto dado depende del clima del lugar, de la densidad de las nubes y de la distribución del vapor de agua en ese lugar. Pero, por otro lado, la distribución de las nubes y del vapor de agua depende de la radiación solar. Por tanto, cuanto más pura sea nuestra atmósfera, menos nubes y vapor de agua habrá en ella, y mayor será la cantidad de radiación solar recibida y el efecto de calentamiento que ésta determina;

pero por esas mismas razones, y debido a los diferentes grados de reflectividad de la superficie de la Tierra, cuanto más pura o limpia esté la atmósfera, *mayor será* el "gradiente" de temperatura y, por tanto, el gradiente de presión entre las regiones polares y las ecuatoriales. Y a la inversa, cuanto más sucia esté nuestra atmósfera (ya sea por causas naturales o artificiales), *menor será* la intensidad de la circulación atmosférica. Por otro lado, tampoco nos interesa que nuestra atmósfera esté excesivamente limpia, ya que ello podría provocar un calentamiento excesivo y la fusión de los casquetes de hielo polares. Si un incremento en la recepción de radiación solar provocase el derretimiento total de los casquetes de hielo polares, los gradientes atmosféricos de temperatura y de presión disminuirían hasta quedar reducidos a la mínima expresión, y el sistema de circulación de las masas de aire se amortiguaría con gran rapidez.

¿De qué depende entonces, en realidad, el futuro de nuestro clima? Una reducción del flujo de energía solar que llega hasta el suelo y la superficie del mar haría disminuir los gradientes térmicos y de presión entre las regiones polares y las ecuatoriales. Esto acarrearía la migración de los frentes polares hacia el ecuador, y la compresión de las células de Ferrel y Hadley. Evidentemente, si la superficie de la Tierra se enfriase, se produciría una intensificación en la circulación atmosférica que provocaría un incremento de la precipitación nivosa en las altas latitudes del hemisferio norte; llegaría un momento en que la nieve acumulada durante el invierno no llegaría a ser derretida por completo al verano siguiente; este fenómeno se manifestaría especialmente en Escandinavia, Groenlandia y el norte del Canadá, y también en las tierras altas como en los Alpes, el Himalaya y las Rocosas. Sin embargo, es probable que los bamboleos de la Tierra respecto a su eje incrementasen el déficit de energía solar de un polo respecto al otro, lo cual a su vez determinaría un crecimiento desigual de los nuevos casquetes de hielo. En los polos, el hielo no se fundiría tan rápidamente como antes debido al enfriamiento generalizado del clima y al elevado albedo de la nieve y el hielo recién acumulados.

En el extremo opuesto, podría ocurrir que el calentamiento creciente de las regiones polares afectase a la estabilidad de los casquetes de hielo en ellas existentes, llegándose a un punto en que la nieve acumulada durante el invierno fuese incapaz de mantenerse hasta el próximo invierno para asegurar así el mantenimiento de los casquetes. De los dos casquetes polares, el más estable es el antártico, una gran extensión helada rodeada por un vasto océano, y a más de 1.300 km de cualquier otra tierra. Su situación geográfica determina el desarrollo de una circulación atmosférica prácticamente independiente de la circulación en el resto del mundo. Se cree que el reciente desplazamiento de la ZCI unos pocos grados hacia el norte es debido a la existencia de este poderoso sistema circulatorio en el hemisferio meridional. Si el casquete antártico se derritiese significativamente, los grandes volúmenes de agua dulce fría liberados empujarían aún más hacia el norte a la ZCI, induciendo la compresión de las zonas climáticas hacia el norte y modificando el clima de Europa y Norteamérica, acarreando por último la posible fusión de todo el casquete ártico. Un incremento de las temperaturas en las zonas tropicales, especialmente en las del hemisferio sur, tendería a incrementar los intercambios entre la región ecuatorial y la antártica, favoreciendo el desplazamiento hacia el sur de la ZCI, que se aproximaría así al ecuador.

La distribución y las trayectorias seguidas por las corrientes de aire próximas al suelo dependen de las altas corrientes en chorro del oeste, las cuales controlan las depresiones y los anticiclones. En los océanos, la fricción entre las corrientes de aire y la superficie del agua es muy pequeña; de ellos procede la humedad que alimenta a las nubes de lluvia que se desarrollan en respuesta a los procesos de convección. Esta humedad precipita sobre las masas de tierra y las cadenas montañosas cuando el aire húmedo se enfría al verse obligado a ascender, ya sea debido a la presencia de barreras montañosas o a movimientos convectivos de aire caliente que empujan el aire húmedo hacia regiones más frías de la atmósfera. En las grandes cadenas montañosas, los flujos de los niveles inferiores de la atmósfera pueden sufrir importantes desviaciones que provocan cambios climáticos locales. Sin embargo, es el modelo climático general el que es realmente importante cuando se trata de analizar las posibilidades de supervivencia bajo condiciones climáticas adversas. Después de muchos años de concienzudas investigaciones, podemos decir que comprendemos buena parte del funcionamiento climático de la Tierra. ¿Pero de qué manera podemos utilizar estos conocimientos para adivinar lo que nos va a deparar el futuro? La respuesta depende por completo de la interpretación que hagamos de los datos climáticos del pasado. Si bien es cierto que los procesos climáticos actuales constituyen la clave para la interpretación del pasado, no es menos cierto que los datos del pasado contienen la clave del futuro.

El estudio de los anillos de crecimiento anuales de los árboles *(dendrocronología)* ha proporcionado gran cantidad de información valiosa. Durante los años especialmente fríos, el crecimiento es mínimo y los anillos son muy delgados; en cambio, durante los años cálidos y húmedos, con condiciones climáticas óptimas, los árboles crecen más rápidamente y los anillos correspondientes son anchos. Para descifrar las pautas del crecimiento de los árboles deben tenerse en cuenta las interrelaciones entre la temperatura, la disponibilidad de agua, los vientos, la duración del día y otros factores locales. Los resultados de este tipo de trabajos nos han permitido adentrar-

nos en el pasado climático de la Tierra con un grado de precisión sorprendente; como patrones de referencia se utilizan las detalladas cronologías de la historia egipcia y otras informaciones valiosas acerca de los climas del pasado reciente, como, por ejemplo, los datos meteorológicos anotados por los capitanes de barco a lo largo de la historia de la navegación. Los libros de navegación eran celosamente guardados, ya que, después de todo, el conocimiento de las condiciones meteorológicas era esencial para la supervivencia de la marina mercante. En el curso de sus singladuras a través del océano Atlántico, algunos barcos midieron la temperatura del agua. Y gracias a las anotaciones conservadas en el Museo Marítimo Nacional de Greenwich sabemos que durante la "pequeña edad de hielo" del siglo XVIII la corriente del Golfo pasaba bastante más al sur que en la actualidad, lo cual parece indicar que la masa de aire frío polar y los cinturones de circulación atmosféricos también se desplazaron hacia el sur en aquella época.

En los Estados Unidos, el estudio detallado de los pinos "Ponderosa", y especialmente de una variedad llamada pino de Colorado existente en las Montañas Blancas de la región centro-oriental de California, ha permitido acumular una gran cantidad de datos acerca de los anillos de crecimiento anuales de estos árboles. Se ha establecido un patrón cronológico para los últimos 900 años y uno de los subproductos más importantes de estos estudios ha sido la recalibración de la escala cronológica basada en el carbono-14. Procesados mediante computador, los datos acerca de los anillos de los árboles pueden proporcionar gran cantidad de valiosa información. Así, por ejemplo, al comparar muestras procedentes de California con otras de Colorado, se vio que las condiciones climáticas que habían reinado en uno y otro lugar durante el año 1849 habían sido muy diferentes. Éste fue el año de la carrera del oro en California. Los árboles californianos desarrollaron anillos delgados, indicadores de un crecimiento escaso y de un suministro de agua muy pobre; en cambio, a 1.100 kilómetros de distancia, en Colorado, los anillos de crecimiento del mismo año fueron anchos, indicando unas favorables condiciones ambientales. Evidentemente, las condiciones climáticas estuvieron muy localizadas durante este período, ya que de no ser así los anillos de crecimiento habrían tenido dimensiones parecidas en ambos lugares.

En las últimas décadas el hombre ha ido contaminando cada vez más la atmósfera; las consecuencias de este hecho se manifiestan de manera particularmente clara en las grandes ciudades industrializadas del mundo. No es infrecuente ver masas ascendentes de vapor y humos que forman nubes oscuras que van creciendo hasta convertirse en altas columnas de cumulonimbos que, finalmente, dejan caer en forma de lluvia el agua que

contienen. La Ciudad de México, por ejemplo, está permanentemente cubierta por una capa de humos y polvo que origina un "efecto de invernadero", impidiendo que el calor escape del interior del recinto natural delimitado por esta capa contaminada, pero permitiendo a la vez la penetración de la energía solar procedente del exterior. Muchos científicos creen que las actividades humanas están cambiando lentamente el clima mundial; así pues, los cambios climáticos que antiguamente sólo estaban asociados con elevadas tasas de actividad volcánica, la cual inducía una contaminación atmosférica natural, podrían relacionarse actualmente con otros factores. Sin embargo, la contaminación industrial no es el único culpable de los cambios climáticos que se están produciendo; los incendios forestales, la desertización inducida por el hombre, las roturaciones con fines agrícolas, todo ello contribuye a incrementar el grado de contaminación atmosférica. El proceso de contaminación atmosférica es acumulativo, ya que los vapores, gases y polvos contaminantes —a menos que se tomen serias medidas para evitarlo— irán reduciendo la recepción de energía solar provocando el enfriamiento generalizado del globo; todo ello traerá consigo el desplazamiento hacia el sur de las zonas climáticas del hemisferio norte. Los desiertos del hemisferio norte también migrarían hacia el sur, acercándose cada vez más al ecuador; esta migración conllevaría, en primera instancia, la conversión de extensas sabanas en polvorientos desiertos. Además, el desplazamiento de las zonas climáticas hacia el sur reduciría el vigor de los monzones en la India y en África, dejando un inevitable rastro de malas cosechas año tras año y permitiendo que el fantasma del hambre se agigantase y causase la muerte de millones de personas.

El incremento de dióxido de carbono en la atmósfera (aproximadamente un 10 % desde finales del siglo XIX) ha determinado que en la actualidad el clima mundial sea algo más cálido de lo que habría sido si tal incremento no se hubiese producido. Sin embargo, esto no evitará nuestro lento pero progresivo acercamiento hacia un período de clima más frío. El efecto de invernadero debido al dióxido de carbono puede estar simplemente retrasando el inicio de la nueva edad de hielo. Respecto a la radiación solar, el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ejerce un doble efecto; por un lado, el influjo creciente de calor solar originado por la mayor concentración de dióxido de carbono refuerza la circulación atmosférica mundial, favoreciendo la formación de nubes; a su vez, esto restringe la cantidad de energía solar que llega a la superficie de nuestro planeta. Por tanto, puede decirse que, en cierto modo, los efectos derivados del incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se anulan mutuamente. Otro factor que interviene en estos procesos es la deforestación, puesto que son las plantas verdes las encargadas

de captar el dióxido de carbono del aire y liberar sus moléculas de oxígeno a través de la fotosíntesis. Únicamente por este motivo ya es de extrema importancia conservar los grandes bosques naturales, como los del Brasil y el Congo, así como también las aguas oceánicas.

En 1970, la sabana del sur del Sahara se vio afectada por una grave sequía, que echó a perder grandes extensiones de tierras agrícolas. Grandes cantidades de partículas del suelo arrastradas por la erosión eólica fueron más tarde detectadas con rayos láser a 20 kilómetros de altura, aproximadamente, por encima del océano Pacífico, donde constituían una capa contaminante de polvo natural. Esta sequía provocó la muerte de miles de árboles y de centenares de animales. Todo ello parecía indicar, entre otras evidencias, que los desiertos del hemisferio norte se estaban desplazando hacia el sur a consecuencia de un enfriamiento en el resto del hemisferio durante la primera mitad de la década de los 70. Sin embargo, en los últimos años esta tendencia parece haberse invertido, pero si estos bruscos cambios climáticos se repitieran unas cuantas décadas más, conducirían finalmente a la evacuación de naciones enteras.

En las regiones fértiles de los países cálidos como la India, en los que precarios sistemas agrícolas deben alimentar a millones de personas, la estabilidad climática y la regularidad en las precipitaciones tienen una importancia capital. En estos lugares, la población ha estado durante los últimos 9.000 años esperando que lleguen los monzones cada estación y rieguen sus cosechas. La mayoría de años la espera no es en vano: los monzones llegan casi siempre, aunque algunos años con considerables retrasos. Únicamente algunos años excepcionales, como 1895 y 1899, los monzones no traen las deseadas lluvias. Entretanto, la población de la India sigue creciendo sin cesar. Bastan unos pocos años malos en que los monzones lleguen con retraso o traigan poca agua para que el hambre haga estragos en el país. Veamos qué es lo que ocurrió en parte de la década de los 70: en 1972 se perdió un tercio de los alimentos debido al mal tiempo; 1973 fue un año normal, con suficiente comida para todos; en 1974 los monzones llegaron con retraso y, en las primeras oleadas, trajeron poca lluvia; después se produjeron lluvias torrenciales que causaron las catastróficas inundaciones de Bangladesh y de parte de Birmania; con ellas llegaron el hambre, las enfermedades y las privaciones de todo tipo; en claro contraste, otras regiones de la India padecieron escasez de agua. Durante la civilización del Indo, en el Rajastán, al noroeste de la India, de ello hace unos 4.500 años, la región se beneficiaba de los frutos de una agricultura floreciente; de hecho, se considera que ése fue uno de los lugares del mundo en que empezaron a desarrollarse las comunidades campesinas. Las cosechas fueron abundantes durante 1.000 años, mientras los monzones iban llegando regularmente con la necesaria lluvia; después, los monzones dejaron de llegar a la región y en ella se instauraron condiciones desérticas, a pesar de que las lluvias seguían siendo abundantes en el resto de la India. Actualmente, es necesario regar artificialmente muchas zonas en las que antes bastaba el riesgo natural que los monzones traían estacionalmente.

Muchos miles de años antes de ese período de fertilidad, en los milenios IV y V a.C., ya existieron en el Rajastán condiciones desérticas mucho más rigurosas que las actuales. Eso sucedió durante el último gran avance de los hielos en el hemisferio norte, hace unos 18.000 años. Puesto qué ese período de fertilidad coincidió con el óptimo climático del actual interglacial, cabe pensar que el retorno reciente a condiciones desérticas demuestra que la Tierra se está aproximando hacia un nuevo período glacial. En este momento, y en relación con las catástrofes naturales, cabe preguntarse qué es lo que nos aguarda en el futuro: ¿Congelación o inundación? ¿Qué sucederá primero? ¿Crecerán súbitamente los casquetes polares? ¿O, quizás antes del retorno de las condiciones glaciales plenas, aún tenemos que pasar por un período de oscilaciones climáticas durante el cual uno o los dos casquetes polares se derretirán? A pesar de que es indudable que en el futuro la civilización se verá amenazada por muchas transgresiones y regresiones marinas, y por muchos avances y retiradas de los hielos, aún no podemos predecir cuál de esos desastres ocurrirá primero ni en qué momento pasará. Tenemos que estar preparados para lo peor. Es fácil imaginar que un período glacial transformaría vastas extensiones de la Tierra en algo parecido a lo que hoy son las gélidas soledades de la Antártida y de parte de Groenlandia, donde los casquetes de hielo alcanzan el kilómetro y medio de espesor. Viviríamos en un invierno perpetuo; el tímido sol veraniego sería incapaz de fundir la nieve acumulada durante el invierno y millones de toneladas de hielo atenazarían las masas continentales. Teniendo en cuenta que los hielos glaciales se forman principalmente a partir de vapor de agua congelado, los grandes volúmenes de agua dulce retenidos en los casquetes de hielo determinarían un incremento en la salinidad de los océanos. Naturalmente, la sustracción de esos enormes volúmenes de agua de la circulación hídrica general del planeta provocaría un importante descenso del nivel de las aguas en los mares y océanos. Esto conllevaría la emersión de extensas zonas de las actuales plataformas continentales, favoreciendo el desarrollo de nuevas playas y plataformas a mayores profundidades. En las altas latitudes, los mantos níveos acumulados sobre esos antiguos fondos oceánicos se incorporarían rápidamente a los casquetes de hielo.

En la periferia de las regiones cubiertas por hielos perpetuos se desarrollarían condiciones propias de la tundra, un auténtico desierto helado en

el que el suelo está congelado hasta varios metros de profundidad; son las condiciones actualmente imperantes en Siberia durante el invierno. El estudio de los fangos de los fondos oceánicos indica que hace 18.000 años las temperaturas eran extremadamente bajas en todo el mundo; en un futuro período glacial, las condiciones ambientales serían parecidas a las existentes por aquel entonces. El potencial mundial de producción de alimentos disminuiría sensiblemente. Tal y como ya hemos dicho anteriormente, las investigaciones más recientes indican que las consecuencias del súbito advenimiento de una nueva edad de hielo serían mucho más terribles de lo que anteriormente se suponía. Las naciones no tendrían tiempo para hacer emigrar progresivamente a sus poblaciones, alejándolas del frente de los casquetes en avance; todo el mundo quedaría atrapado en ellos, práctica-

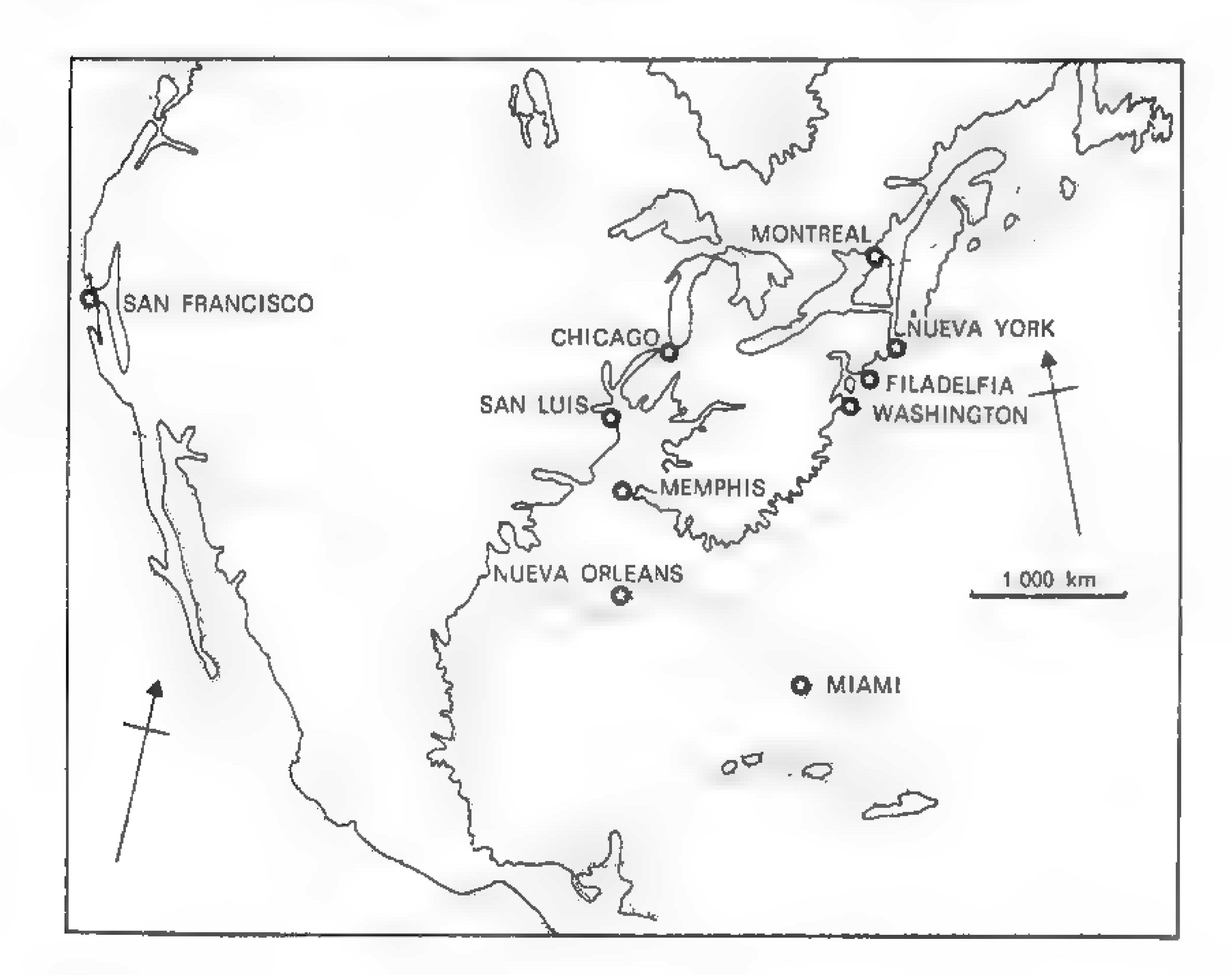


Fig. 27. Lo que quedaría de Norteamérica si se derritiese el 75 % de los hielos polares. El peligro principal, aparte de la pérdida de todas las ciudades y zonas urbanas costeras e insulares, sería la inundación de extensas áreas de tierras agrícolas de importancia fundamental. Obsérvese que algunas grandes ciudades situadas actualmente en el interior, se convertirían en puertos de mar.

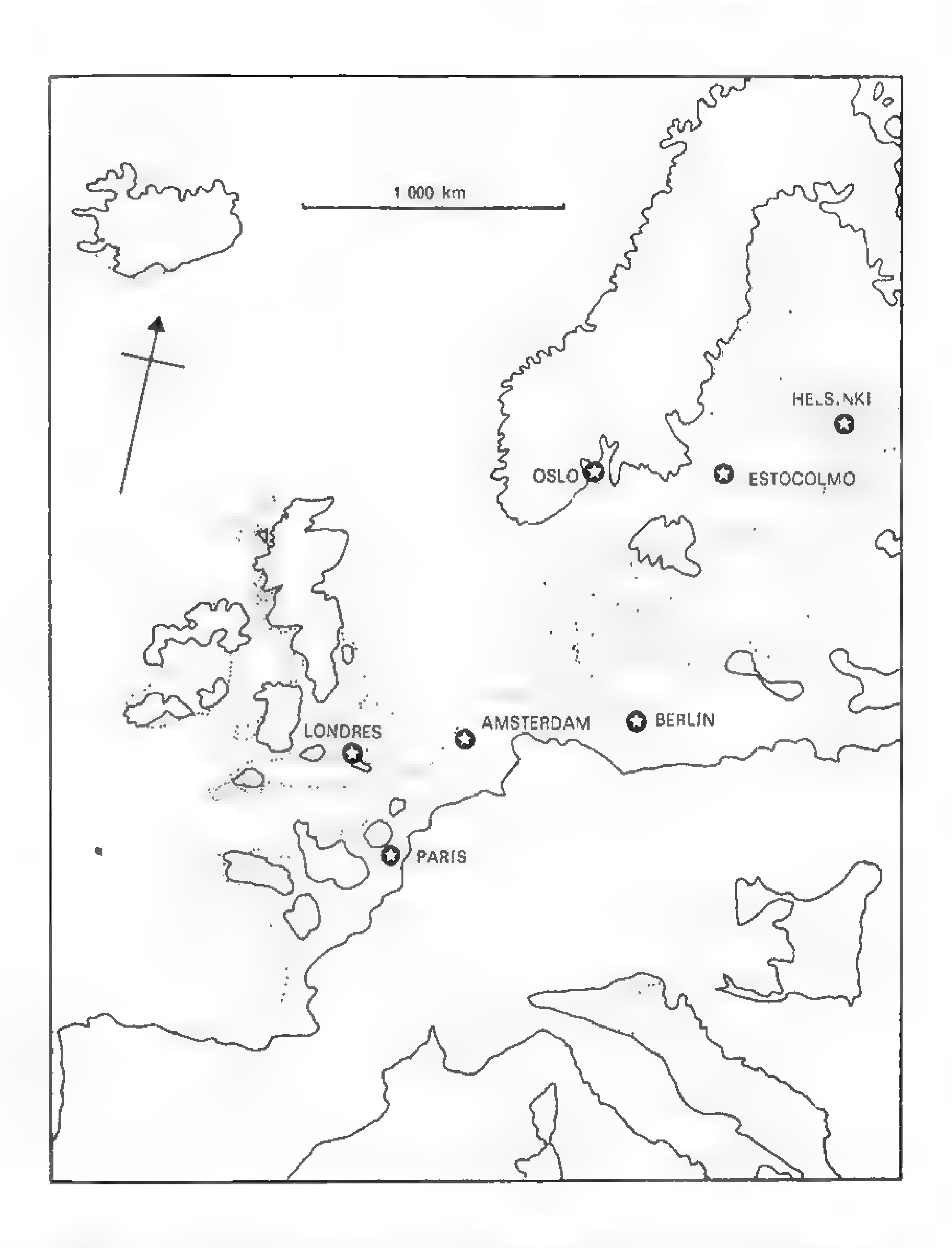


Fig. 28. Lo que quedaría de Europa si se derritiese el 75 % de los hielos polares. Gran Bretaña perdería todas sus tierras agrícolas y se transformaría en un grupo de pequeñas islas. Holanda desaparecería, al igual que todas las zonas urbanas costeras y muchas ciudades del interior.

mente de la noche a la mañana. Recalquemos una vez más que si bien las actividades del hombre podrían estar retrasando el advenimiento de una nueva edad de hielo, también debe tenerse presente que, en su ignorancia, podrían estar en realidad acelerando la llegada de ese helado horror. Indudablemente, una nueva edad de hielo podría ser tan devastadora como una guerra termonuclear, aun teniendo en cuenta que no existiría riesgo de radiaciones. Ejercería una presión inconmensurable sobre los recursos alimenticios y agrícolas, así como sobre las reservas energéticas y minerales.

Es posible que alrededor del cuarto milenio antes de Cristo, y por un corto espacio de tiempo, no existiese ningún casquete de hielo permanente en el hemisferio septentrional; sin embargo, este casquete pronto volvió a restablecerse, acarreando cambios climáticos en Siberia, Europa y Norteamérica; estos cambios se traducirían por un descenso generalizado de las temperaturas y por un incremento en el número de depresiones en las latitudes bajas. Durante este período óptimo de mejoramiento climático, el ascenso subsiguiente del nivel mundial del mar ("ascenso eustático") debió ser del orden de unos 3,5 metros. En tiempos más recientes se han producido varias oscilaciones eustáticas de menor magnitud, entre las que se cuenta un ascenso del nivel del mar del orden de unos 3 metros y varios mínimos eustáticos durante los cuales se desarrollaron en las regiones costeras bosques actualmente sumergidos. En las costas del sur del condado de Kent, en Inglaterra, por ejemplo, pueden hallarse evidencias de niveles eustáticos bajos durante la época de los romanos y en los siglos VIII y XV; en cambio, en el siglo XIII el nivel del mar era alto, parecido al de hoy en día. En esa región, y a partir del siglo XV, el ascenso se ha producido a una tasa de aproximadamente 30 centímetros por siglo. Entre el Wash y el norte de Kent, las costas de Inglaterra están descendiendo lentamente en dirección a la cuenca del Mar del Norte debido a complejas interrelaciones entre las fuerzas isostáticas y las geotectónicas. Las fluctuaciones del nivel del mar causadas por la fusión o el crecimiento alternativos de los casquetes de hielo polares se superponen a este movimiento descendente a largo plazo. Así, en Londres, en el estuario del Támesis y en diferentes partes de East Anglia, las evidencias de un reciente avance del mar son manifiestas. Los restos romanos de Tilbury, por ejemplo, están actualmente 4,5 metros por debajo del nivel de la marea alta. Volveremos a hablar de los problemas inherentes a las costas subsidentes en el capítulo 8.

Cuando, en algún momento del futuro, un mejoramiento climático generalizado provoque la fusión de la mayor parte o de todo el hielo actualmente acumulado en los casquetes polares y en los glaciares de las regiones montañosas, y cuando esa agua vuelva a los océanos, éstos experimentarán un rápido y catastrófico ascenso. El mar inundará rápidamente

todas las regiones bajas de la Tierra; la mayor parte de ciudades industriales, así como muchas otras, serán inundadas (lámina 21). Sin embargo, la mayor pérdida para el hombre será la destrucción de prácticamente todas las mejores tierras agrícolas del mundo, que quedarán sumergidas bajo las aguas. Un ascenso eustático de tan sólo 30-60 metros tendría consecuencias casi tan calamitosas como el máximo ascenso posible, unos 100 metros. Los terrenos agrícolas y ganaderos de las zonas altas del mundo —lo único que quedaría por encima del nivel de las aguas— no producirían lo bastante como para mantener a toda la población actual. Teniendo en cuenta el bajo grado de evolución social del hombre, y especialmente en lo que hace referencia a su codicia y a su incapacidad para coexistir pacíficamente, parece evidente que la escasez de alimentos originada por un gran avance o un gran retroceso de los hielos sería la chispa que desencadenaría conflagraciones bélicas de imprevisibles consecuencias. Se llegaría, casi con absoluta certeza, a la utilización de armas nucleares. ¿Son los gobiernos de este planeta conscientes de todo esto? ¿Se dan cuenta de las consecuencias que tendría otra edad de hielo, o incluso la fusión total o de gran parte de los casquetes de hielo polares? ¿Saben que si esto ocurriese quedarían inundadas la mayor parte de grandes ciudades del mundo? En un 95 % de los casos la respuesta correcta es no. Tenemos que estar concienciados acerca de lo que el futuro puede depararnos, y en este sentido quizá sea correcto decir que las malas predicciones son peores que ninguna predicción.

Tal y como ya hemos visto, en diversas ocasiones a lo largo de los tiempos históricos el hombre se ha visto sometido a condiciones ambientales excepcionalmente severas. Probablemente estas "mini-edades de hielo" a que nos estamos refiriendo causaron menos molestias e inconvenientes durante el siglo XIX de las que causarían en la actualidad en nuestra adelantada sociedad tecnológica. Sin embargo, lo que realmente nos preocupa no son esas mini-edades de hielo. El hombre debe tener presentes las consecuencias que acarrearía una gran congelación, un retorno a las condiciones glaciales que ya existieron en el hemisferio norte hace unos 10.000 años.

Es dudoso que cuando el próximo episodio glacial comience, el hombre esté preparado para hacerle frente. Las predicciones meteorológicas de condiciones adversas a largo plazo, indicadoras de la posible llegada de un nuevo período glacial, quizás sean interpretadas erróneamente y aceptadas simplemente como la llegada de otro invierno riguroso. La gran congelación puede iniciarse de forma gradual, con elevadas precipitaciones nivosas durante los meses invernales, aunque también puede iniciarse bruscamen-

te, acompañada por ventiscas como las que azotaron Norteamérica a comienzos del año 1977. Ocurra lo que ocurra, el resultado final será el mismo: a finales de febrero la mayor parte del hemisferio norte estará cubierta por gruesos y extensos mantos de nieve. Sólo entonces aparecerá la diferencia con un invierno normal, cuando la esperada fusión de las nieves no se produzca y la temperatura siga siendo baja, produciéndose ocasionalmente nuevas precipitaciones nivosas. Las grandes nevadas, las temperaturas por debajo de cero y los furiosos vientos gélidos paralizarán indudablemente muchas de nuestras ciudades; los coches no podrán circular, el ferrocarril quedará bloqueado y las líneas de comunicación cortadas (lámina 20).

Las autoridades y las organizaciones locales no podrán hacer frente a tales condiciones meteorológicas, los quitanieves normales no podrán trabajar eficazmente y es dudoso que los más poderosos cortanieves puedan estar disponibles en número suficiente. Todos los intentos que se hagan por apartar la nieve estarán condenados al fracaso porque el espesor de la misma no cesará de aumentar. Los esfuerzos por cubrir las carreteras supondrán un trabajo demasiado grande y muy pronto se haría evidente que aquello es otra batalla perdida. En todo caso, el fracaso de los intentos por quitar la nieve no sería excesivamente grave, ya que sus propiedades aislantes protegerían el suelo; la temperatura en los suelos cubiertos de nieve raramente desciende por debajo de los 2 °C, mientras que una temperatura ambiental de −30 °C puede ocasionar graves daños en la superficie de las carreteras y calles que no disfruten de esa capa nívea protectora. Por el mismo motivo, las casas cubiertas parcialmente por la nieve sólo necesitarían consumir el combustible habitual, o incluso menos, para mantener una temperatura interior agradable; estos ahorros de energía tendrían un gran valor económico en las regiones con dificultades en el suministro de combustibles.

Durante el verano del primer año, después de tan riguroso invierno, las temperaturas podrían alcanzar los 16 °C, provocando la fusión parcial de la capa de nieve; en los días muy secos también podría producirse la evaporación de ciertas cantidades de nieve, que se convertirían directamente en vapor de agua sin haber pasado previamente por el estado líquido (este proceso se llama "ablación"). La agricultura acusaría el golpe, ya que la prolongación de las condiciones invernales retrasaría las tareas de arado y siembra, incluso en las zonas que puedan quedar libres de nieve. Las temperaturas veraniegas representarían una pequeña ayuda para la agricultura; mientras tanto, el nivel de precipitaciones habría ido disminuyendo paulatinamente. El período de crecimiento óptimo de las plantas se acortaría sensiblemente y la temprana llegada de los primeros fríos invernales impediría

la maduración de las cosechas que hayan podido crecer. Por tanto, muchas plantas morirían o darían sus frutos con retraso debido a la reducción en la duración de la estación de crecimiento.

Mientras tanto, irían llegando informaciones que hablarían de las grandes sequías y de la desertización creciente del sur del Sudán, del norte de Nigeria, del norte de China y Pakistán en el continente eurasiático, y del centro de México y de algunos de los estados sureños de los Estados Uni-

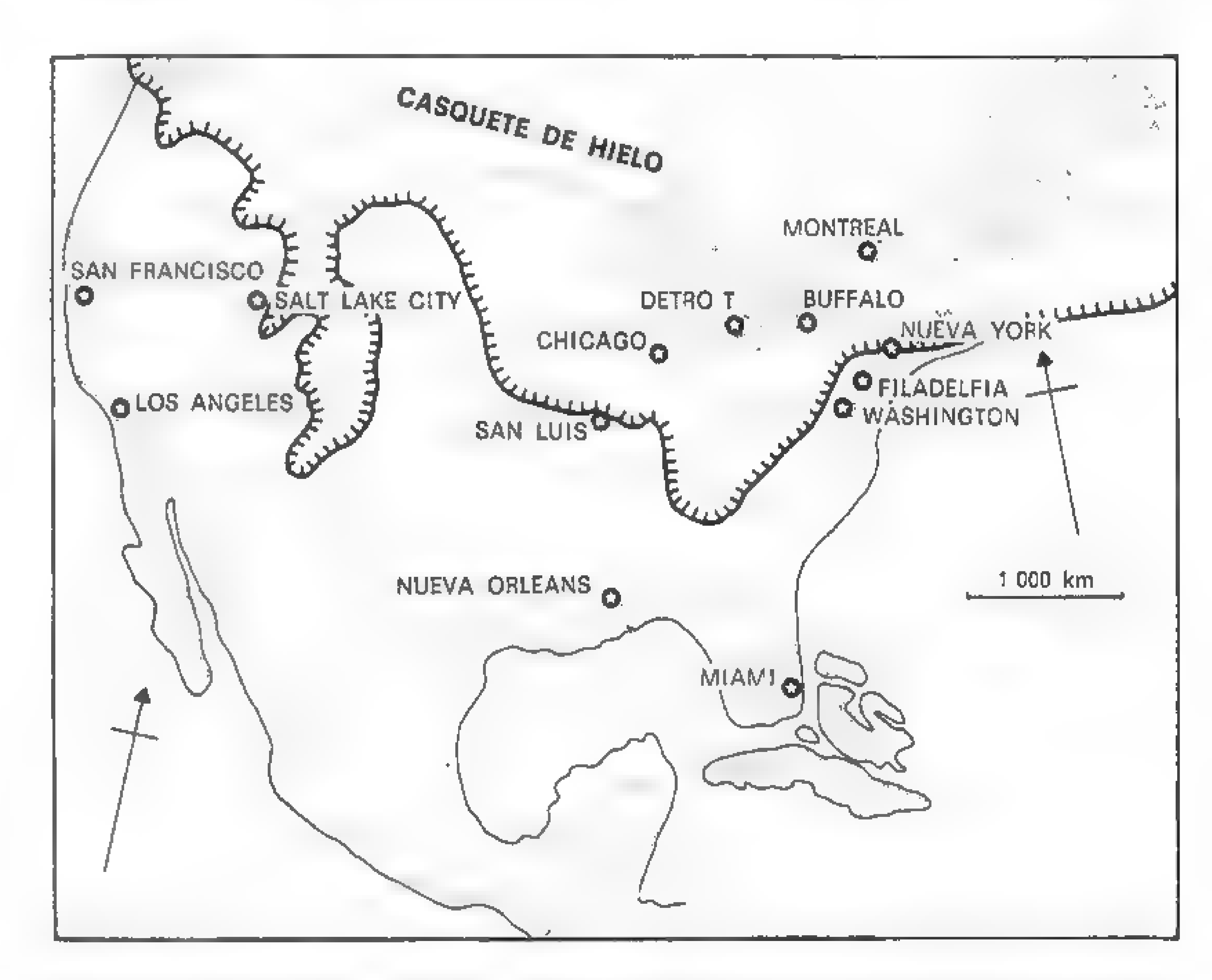
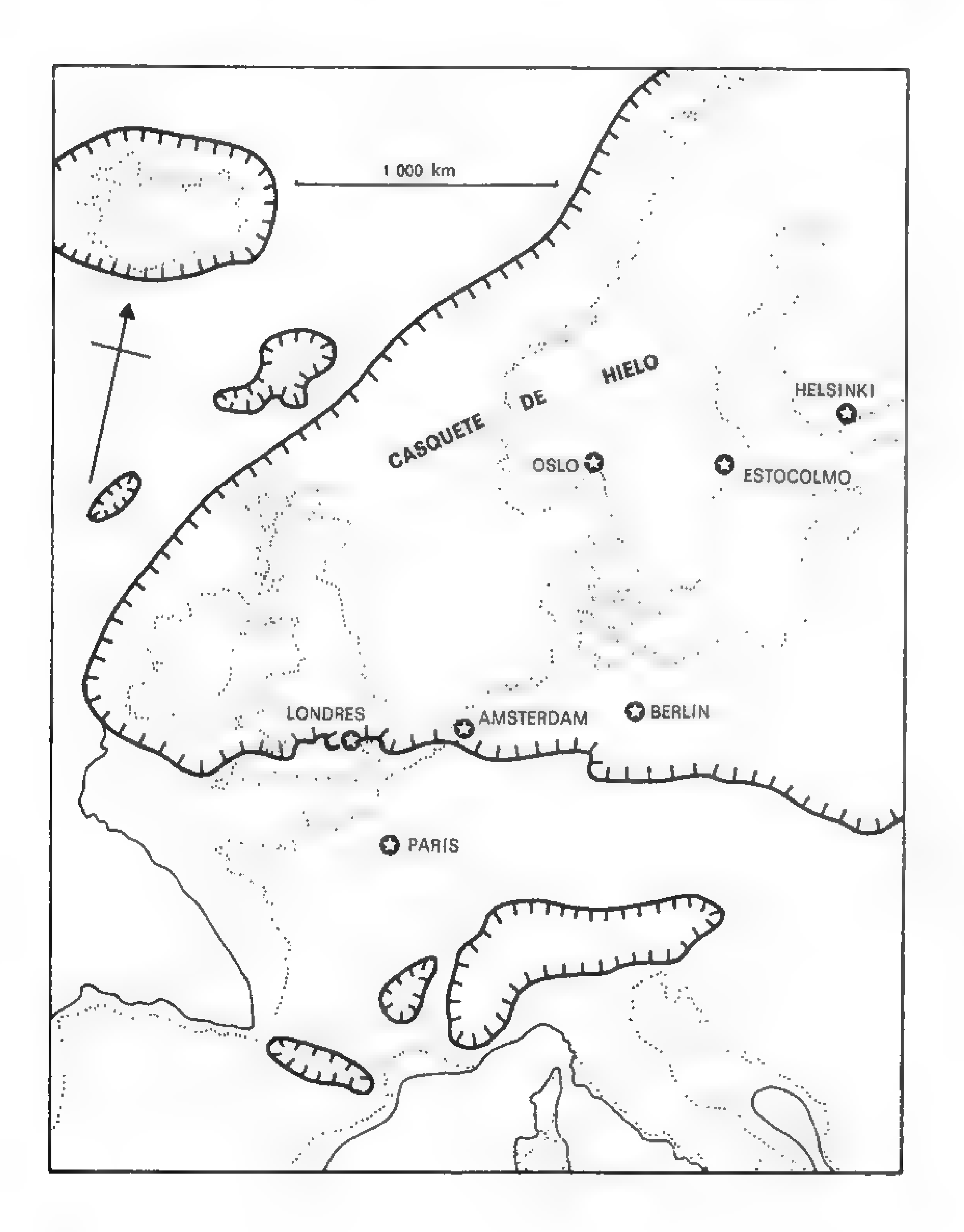


Fig. 29. Mapa del riesgo de glaciación en Norteamérica. El retorno de una edad de hielo en el hemisferio septentrional tendría efectos tan desastrosos como la fusión total de los hielos polares. Todo Canadá y extensas zonas de Estados Unidos quedarían sepultadas por una capa de muchos metros de hielo y nieve; al sur del casquete helado enormes áreas quedarían asoladas por unas condiciones ambientales parecidas a las actualmente imperantes en la tundra siberiana, hecho que repercutiría negativamente sobre muchas áreas de gran importancia agrícola. A medida que la glaciación avanzase, el nivel del mar iría descendiendo y sus aguas serían cada vez más saladas, ya que los casquetes emplean para su formación principalmente agua dulce. Las plataformas continentales internas emergerían debido a la retirada de las aguas y los actuales puertos perderían toda su utilidad al quedar situados en el interior.

dos en el continente norteamericano. Los cambios climáticos empujarían inexorablemente hacia el sur a los desiertos subtropicales. Tribus enteras morirían por inanición; y las que no lo hiciesen se verían obligadas a emigrar hacia el sur en busca de pastos más verdes, aun con el riesgo de que se



desatasen conflictos mortales con los nativos cuyas tierras estarían invadiendo.

A finales del primer verano, tanto Europa como Norteamérica presentarían un aspecto lamentable. Miles de ancianos y niños habrían muerto prematuramente de hipotermia, influenza y enfermedades parecidas. Los combustibles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, estarían muy solicitados. Los bosques empezarían a ser talados y las construcciones de madera serían expoliadas por manadas de gente en una interminable busca de combustibles. Quizás en el mes de agosto del primer año frío tan sólo quede una delgada capa de nieve, de unos pocos centímetros de espesor, en las regiones templadas del hemisferio norte; pero la situación empeorará cada vez más, y cuando comience el segundo invierno ártico tanto los científicos como los gobernantes ya se habrán dado cuenta de que aquello no es más que el inicio de la gran congelación. En ese momento, ya será necesario racionar los alimentos; las pobres cosechas del año no serán suficientes para asegurar la reposición de las reservas alimenticias consumidas. El hambre, esa plaga que en el pasado sólo había golpeado a las naciones más pobres y subdesarrolladas de la Tierra, empezaría a azotar las avanzadas civilizaciones occidentales. Éstas quedarían cogidas en una catástrofe natural que nunca hubiesen creído que las azotaría, ni siquiera remotamente. Cuanto más escasos fuesen los suministros de verduras y frutas frescas, más casos de desnutrición, y especialmente de falta de vitamina C, habría.

El segundo invierno traería consigo nevadas aún más fuertes. La nieve caída se acumularía sobre la que hubiese quedado del año anterior, cubriéndose así las primeras etapas en la carrera hacia una nueva glaciación. Suponiendo que cada año quedase sin derretir tan sólo el 20 % de la nieve caída, una tasa de acumulación de sólo 90 centímetros por año haría que al cabo de 10 años la capa de nieve permanente alcanzase el metro ochenta de espesor. Cuanto más al norte, mayores serían los espesores, y a la inversa para las regiones más meridionales de la capa de nieves perpetuas.

Las centrales hidroeléctricas dejarán de funcionar al congelarse los suministros de agua que necesitan. Las centrales térmicas únicamente podrán

◀ **Fig. 30.** Riesgo de glaciación en Europa. Debido a su situación latitudinal, Europa se vería más afectada que Norteamérica por la reinstauración de condiciones glaciales. La mayoría de capitales de la CEE sufrirían las consecuencias directas del avance de un casquete polar, debido a que la nieve caída durante el invierno no se derretiría por completo durante el verano. Asociado a este hecho se produciría un descenso del nivel del mar que situaría la línea de costa en el borde de la plataforma continental; tanto en el antiguo fondo marino como en las tierras situadas al sur de dicho casquete se implantarían condiciones climáticas propias de la tundra, lo cual acarrearía la destrucción de las zonas agrícolas.

seguir funcionando en tanto en cuanto se mantengan abiertas las vías de comunicación a través de las cuales les llegan el carbón y los hidrocarburos. Probablemente, las centrales nucleares serán las que podrán seguir funcionando durante un mayor espacio de tiempo, al menos hasta que no se congelen los suministros de agua que necesitan para su refrigeración. Sus cálidos efluentes pueden retrasar durante un tiempo la congelación de sus depósitos de agua, pero sólo durante un tiempo; tarde o temprano acabarán por congelarse. El nivel del mar irá descendiendo a medida que nuevos volúmenes de agua vayan solidificándose en forma de nieve e hielo. Cuando esto ocurra, los actuales puertos marítimos no servirán para nada. Puesto que los bosques ya habrán sido arrasados por los supervivientes o bien yacerán bajo una gruesa capa de nieve, la ausencia de otros combustibles alternativos determinará el inminente colapso de la civilización. Los que no mueran de inanición, morirán inevitablemente de frío, y aquellos que hayan decidido emigrar hacia el sur en busca de climas más cálidos deberán hacer frente inevitablemente a graves problemas culturales y sociales, puesto que se habrán convertido en una raza minoritaria en lo que quizás llegue a ser un mundo habitado mayoritariamente por gentes de color. Si tal catástrofe natural sucede alguna vez, el hombre blanco del hemisferio septentrional estará al borde de la extinción y quizá lo traspase.

La perspectiva de que nuestros países queden sepultados bajo una gruesa capa de hielo y nieve es aterradora, pero no por ello debemos dejar de analizar las consecuencias que tendría la fusión parcial o total de los casquetes polares. Se ha calculado que si todo el hielo retenido en la Antártida se fundiese, el nivel medio de los mares y océanos ascendería unos 100 metros, suficientes para sumergir el domo de la catedral de San Pablo, en Londres. Una catástrofe de este tipo tendría efectos tanto o más devastadores que la "muerte por congelación", ya que casi todas las principales regiones agrícolas del mundo serían cubiertas por las aguas. La mayoría de grandes ciudades del mundo —Nueva York, Londres, París, Tokio, Sidney, Melbourne y Roma, por ejemplo— reposarían irremediablemente hundidas bajo muchas brazas de mares y océanos. Únicamente sobrevivirían algunas ciudades como Pekín, Lima, Kampala y tal vez Moscú. La fusión del casquete de hielo ártico tendría efectos parecidos, por lo que debe pensarse qué es lo que sucedería si esa extensa región de hielo menos estable se derritiese, conjuntamente o no con el casquete antártico.

El deseo del hombre por convertir los desiertos en zonas fértiles cuyos productos ayuden a satisfacer las necesidades alimenticias de la creciente población mundial ya ha cristalizado en algunas acciones concretas, como, por ejemplo, remolcar grandes bloques de hielo desde la Antártida hasta Sudamérica. Años atrás también se sugirió que esto podría tener interés

para Arabia Saudí y los países vecinos. El uso moderado de estas reservas de hielo no comporta ningún peligro, pero algunos científicos e ingenieros ya han propuesto la rotura y posterior fusión de los casquetes de hielo mediante ingenios nucleares o termonucleares. Dejando de lado el riesgo radiactivo de tales hipotéticas operaciones, el brusco derrame de grandes cantidades de hielo en el océano Antártico lo enfriaría considerablemente, empujando a la ZCI hacia el norte. El desplazamiento subsiguiente de todo el clima mundial podría provocar, en última instancia, la fusión generalizada del casquete ártico. Además, existe la posibilidad de que ninguno de los casquetes de hielo fuese capaz de recuperarse lo bastante rápido después de sufrir este tipo de agresiones, provocando así la fracturación y la rotura de un continente entero que se vería bruscamente descargado del peso de los hielos que ha estado soportando durante milenios.

La fusión de los casquetes polares más allá del punto de recuperación crítico puede deberse a causas naturales cuyos efectos el hombre puede contribuir a acelerar. De cualquier modo, los casquetes polares ya se han derretido antes, y pueden volver a hacerlo en el futuro. La inundación subsiguiente de extensas regiones de la Tierra sería un proceso lento pero inexorable. Probablemente, los primeros indicios se percibirían en lugares como Londres y los Países Bajos, en donde, incluso en la actualidad, si las condiciones meteorológicas son lo bastante malas, las tormentas del mar del Norte han provocado terribles inundaciones que han dejado tras de sí un penoso rastro de vidas humanas segadas y de daños materiales. Si uno de los casquetes polares se derritiese, en un plazo de digamos 200 años, Londres ya estaría inundada durante los primeros 6 años; si los hielos tardasen 1.000 años en derretirse, Londres ya estaría inundada al cabo de 28 años, si no antes. Las autoridades y los científicos pronto se darían cuenta del problema y ordenarían la construcción de diques y polders con el fin de detener el avance de las aguas; pero cuando eso sucediese, la situación ya sería desesperada y todos los esfuerzos estarían condenados de antemano al más lamentable de los fracasos. Holanda, el valle del Po, el norte de Alemania, Dinamarca y las regiones bálticas rusas serían invadidas por las aguas en ascenso. Lo mismo ocurriría en vastas zonas de Irak, Arabia Saudí, Pakistán, China y Sudamérica —Argentina, Venezuela y la cuenca amazónica—. En Norteamérica, el Canadá perdería extensas áreas de sus territorios septentrionales, mientras que en los Estados Unidos todo el valle del Mississippi quedaría inundado, afectando en consecuencia a los estados de Louisiana, Mississippi, Texas, Alabama, Arkansas y Tennessee. En la costa occidental, Florida desaparecería por completo, mientras que Georgia, Carolina y Virginia perderían sus puertos y ciudades costeras; entre ellas Boston, Washington y Nueva York quedarían inundadas. Así, mientras una

nueva glaciación haría que extensas regiones del hemisferio norte quedasen cubiertas por los hielos y empujaría las zonas climáticas hacia el sur, un gran ascenso eustático acarrearía la pérdida de las regiones agrícolas más productivas del mundo, sumiendo a toda la humanidad en la miseria, el hambre y la desesperación. Una catástrofe de estas características provocaría un cambio tan brusco en el actual modelo de civilización que la propia evolución del *Homo sapiens* entraría en una fase totalmente nueva. De hecho, muchas formas de vida vegetal y animal se verían arrastradas a la extinción o, a lo mejor, se verían abocadas a seguir nuevas tendencias evolutivas.

VII. BOMBARDEOS EXTRATERRESTRES

Arriba de los techos apiñados, en la parte baja
del cielo meridional, vieron una gran estrella
con un triple reguero de fuego... El duque Guillermo dijo:
"Es la espada de Dios levantada contra el rey Harold.
San Miguel y sus Ángeles luchan contra nosotros."

Hope Muntz, *El Guerrero Dorado*

Sabemos que hace unos 25.000 años un gran meteorito cayó sobre la Tierra formando un cráter de 1.200 metros de diámetro en el desierto de Arizona. Descubierto en 1891, el gran agujero circular de 183 metros de profundidad, y con un reborde que se alza entre 40 y 50 metros por encima del desierto adyacente, fue llamado primeramente Coon Butte, pero actualmente se le conoce con el nombre de Barringer o Meteor Crater (lámina 23). En 1894 ya se había demostrado el origen meteorítico de los fragmentos de hierro hallados alrededor del cráter, aunque muchos científicos aún seguían insistiendo acerca de un origen volcánico. La posibilidad de que la Tierra pudiese constituir el blanco de proyectiles extraterrestres no fue aceptada por la ciencia ortodoxa hasta bien entrado el siglo XX. Un ingeniero de minas, D. M. Barringer, pasó 25 años intentando demostrar que el cráter había sido causado por un impacto meteorítico; esta hipótesis no sería plenamente aceptada hasta el año 1931, en que se descubrieron en Henbury, Australia, otros cráteres de origen meteorítico indudable.

Esparcidos por el desierto de Arizona, en un radio de 10 kilómetros alrededor del cráter, han sido hallados fragmentos de hierro meteorítico de hasta 45 kilos de peso, hasta totalizar un peso global de más de 20 toneladas. En el fondo del cráter hay depósitos lacustres fosilíferos, de 20 a 30

metros de espesor, que datan del penúltimo episodio de la glaciación pleistocénica en Norteamérica; el cráter Barringer debe tener, por tanto, alrededor de unos 25.000 años de antigüedad. El cráter está rodeado de areniscas y calizas pérmicas inclinadas hacia el exterior del mismo en todas direcciones. Los fragmentos de estas rocas, especialmente de las calizas, están esparcidos por el interior del cráter, por sus bordes y en un radio de 10 kilómetros alrededor del mismo; algunos de estos fragmentos llegan a pesar 4.000 toneladas. Nadie cree hoy en día en las hipótesis que proponían un origen volcánico o kárstico (colapso de una caverna) y contra las cuales tuvo que luchar tanto Barringer. El círculo del cráter es demasiado perfecto y la concentración de hierro meteorítico alrededor del cráter sólo puede ser explicada satisfactoriamente si se le atribuye al propio cráter un origen meteorítico. Durante mucho tiempo Barringer pensó que debajo del cráter había un gran meteorito de hierro enterrado. Se gastaron centenares de miles de dólares en perforar el subsuelo del cráter, pero los sondeos no hallaron más que un nivel de areniscas pérmicas fragmentadas y metamorfizadas de 190 metros de espesor, debajo del cual lo único que había eran estratos no perturbados. El hecho de que no se hubiese hallado ningún gran cuerpo meteorítico hizo que durante un tiempo aumentaran las dudas acerca del origen meteorítico del cráter; esta situación persistió hasta que alguien se dio cuenta de que, al chocar con la Tierra, el meteorito no se sepultó sino que debió de explotar. El cráter Barringer es, de hecho, un gran cráter de impacto meteorítico fragmentario, lo bastante joven como para que aún se hallen en sus inmediaciones los fragmentos de hierro resultantes del citado impacto. Se cree que el meteorito que originó el agujero debía pesar muchos miles de toneladas, quizás millones, pero a consecuencia del impacto se fragmentó por completo, experimentando asimismo una vaporización generalizada. El gran impacto originó una disrupción y la fusión parcial de las capas de areniscas y calizas del subsuelo del desierto hasta una profundidad de varias decenas de metros. En varios kilómetros a la redonda pueden hallarse pequeñas esférulas de vidrio resultantes de la fusión de esas rocas; se cree que esas esférulas salieron despedidas del cráter en todas direcciones en el momento de producirse el impacto. Otras evidencias de un enorme impacto son la formación de harina de roca (fragmentos de roca muy finamente pulverizados) y la presencia de ciertos minerales silicatados que sólo se forman bajo condiciones de presión extremadamente elevadas. Se cree que la fuerza explosiva del impacto fue equivalente, como mínimo, a 5 megatones de TNT.

Los pequeños proyectiles procedentes del espacio a alta velocidad ponen en peligro nuestras vidas todos los días. Son los fragmentos de roca o

residuos metálicos extraterrestres que bombardean constantemente la Tierra. Sin embargo, las probabilidades de que uno de nosotros reciba uno de estos impactos son muy pequeñas; a pesar de ello, hay datos históricos acerca de "piedras del cielo" que han matado a personas y numerosas evidencias de que han causado daños en edificios y objetos. Por la noche es posible ver cómo estos cuerpos extraterrestres cruzan nuestra atmósfera: son los bólidos y estrellas fugaces. La mayoría de ellos son consumidos por las llamas antes de alcanzar el suelo; sin embargo, los restos sólidos de algunos de ellos llegan a impactar contra el suelo, aplicándoseles entonces el nombre de *meteoritos*. Los científicos llaman *meteoros* a los que se vaporizan por completo en contacto con nuestra atmósfera.

Se calcula que la altura a partir de la cual estos objetos están lo suficientemente calientes como para devenir visibles es de unos 90 a 160 kilómetros. Un meteorito tan pequeño como una cabeza de alfiler puede brillar con una luminosidad igual a la de una estrella. En algunas ocasiones se ha podido observar cómo la superficie de la nieve fresca queda cubierta por diminutas gotas de hierro fundido instantes después de que un grupo de estrellas fugaces ha cruzado el cielo. A veces, algunos meteoritos caídos sobre edificios han terminado su viaje espacial de forma harto curiosa, encima de camas, en macetas de flores o incluso, en el caso de uno que aterrizó en un hotel del norte de Gales, dentro de un orinal. Antes de que comenzase la exploración del espacio, se predecía que ningún hombre ni vehículo espacial podría sobrevivir durante mucho tiempo sin la protección de nuestra atmósfera. Se creía que una vez en el espacio serían seriamente dañados por el incesante bombardeo de meteoritos que caen hacia nuestro planeta al ritmo de muchos millones diarios. Los primeros satélites artificiales se encargaron de demostrar que el peligro de los meteoritos había sido considerablemente sobrevalorado; no obstante, aunque no haya ocurrido aún, no hay duda de que tarde o temprano una nave espacial será seriamente dañada por un impacto meteorítico.

El mayor peligro potencial para la vida en nuestro planeta procede indudablemente del espacio. La colisión con otro cuerpo espacial de gran tamaño o con un "agujero negro" podría destruir casi instantáneamente la Tierra. La aproximación excesiva a un cuerpo mayor o de tamaño equivalente al de la Tierra podría tener igualmente consecuencias nefastas, ya que podría provocar la parcial o total destrucción del género humano. Si las velocidades de impacto fuesen lo bastante grandes, incluso la colisión con cuerpos extraterrestres relativamente pequeños podría ocasionar daños catastróficos en la atmósfera, los océanos y la corteza superior. Las probabilidades de colisión con un gran cuerpo astronómico del exterior de nuestro sistema solar son extremadamente pequeñas, posiblemente menos de una

vez en la vida de una estrella media. Sin embargo, sabemos que en nuestra galaxia existen grandes nubes de polvo interestelar y algunos astrónomos han sugerido la posibilidad de que también existan grandes corrientes de material meteorítico que podrían llegar a penetrar en el sistema solar. Aun desechando esta posibilidad, nuestro propio sistema solar contiene una gran cantidad de pequeños cuerpos astronómicos como, por ejemplo, los planetas menores o asteroides y los cometas, algunos de los cuales tienen órbitas excéntricas que les aproximan ocasionalmente a la órbita de la Tierra. A pesar de que es muy difícil determinar con alguna precisión las posibilidades existentes de que se produzca una colisión entre la Tierra y alguno de los grandes asteroides o cometas, varios estudios estadísticos han llegado a demostrar que este tipo de colisiones ocurren y que, además, fueron muy frecuentes en los primeros tiempos de la historia de la Tierra. Otra manera de abordar el problema es examinar tanto el registro histórico como el registro geológico en busca de evidencias de antiguos impactos. A partir de los resultados obtenidos, y admitiendo de alguna manera su representatividad, puede hacerse una estimación de la envergadura y la frecuencia con que pueden ocurrir futuros desastres de origen extraterrestre. Haciendo extrapolaciones a partir de la frecuencia probable con que la Tierra es bombardeada por cuerpos astronómicos muy pequeños —meteoros y meteoritos— se llega a la conclusión de que puede producirse una colisión con un cuerpo del tamaño de un asteroide cada 1-50 millones de años (tabla 7-1). Este cálculo no es incompatible con el hecho de que se hayan hallado al menos 50 grandes estructuras de impacto —los llamados *astroblemas*— repartidas entre los diferentes continentes.

Tabla 7-1. Frecuencia aproximada del actual bombardeo extraterrestre que sufre la Tierra

Peso de los objetos antes de que entren en la atmósfera terrestre	Frecuencia media aproximada
«Polvo» espacial	Más de un millón de toneladas se filtra cada año hasta la superficie de la Tierra
Meteoros que sólo son visibles con telescopios (se incendian al penetrar en la atmósfera)	Más de 1.000.000.000 diarios
Meteoros visibles a simple vista (se incendian al penetrar en la atmósfera)	Más de 500.000 diarios
Pequeños meteoritos, alrededor de 500 g (sólo unos pocos gramos llegan al suelo)	3 ó 4 diarios, pero irregularmente, a veces llegan en grupos compuestos por muchas unidades
5 toneladas (al suelo no llegan más de 500 kg)	1 al mes
50 toneladas	1 cada 30 años
250 toneladas	1 cada 150 años
50.000 toneladas	1 cada 100.000 años
Pequeños planetas (asteroides) con diámetros del orden de varios kilómetros	1 cada 1-50 millones de años

Los movimientos del Sol y de la Luna y el lento giro de las estrellas en el cielo nocturno han fascinado al hombre desde la noche de los tiempos. Muchos hombres han pasado buena parte de su vida contemplando el cielo, y la influencia de sus observaciones sobre las creencias y prácticas religiosas ha sido enorme. Los grandes círculos de piedras, como el de Stonehenge, en Inglaterra, demuestran la importancia de las observaciones astronómicas sobre las vidas de nuestros antepasados. La presencia de rasgos inusuales en el cielo nocturno siempre ha sido interpretada como algo mágico y portentoso. El cometa Halley apareció en el cielo el año 1066, en vísperas de la conquista normanda; para el rey Harold de Inglaterra aquel signo era un mal presagio, tal y como consta en el Tapiz de Bayeux lámina 22). A lo largo de la historia, el hombre ha quedado fascinado por las "estrellas fugaces", los "bólidos", los "rayos" y las "piedras del cielo"; antaño se creía que eran "regalos de los dioses" e incluso los más pequeños meteoritos eran recogidos y guardados cuidadosamente en los templos. En el templo de Diana, en Éfeso, por ejemplo, se guardaba una piedra meteorítica que se suponía había sido lanzada por la diosa. La famosa Piedra Negra de La Meca es aún hoy en día el principal lugar de peregrinaje para todo el mundo islámico. Un gran meteorito que cayó en Frigia durante el siglo III a.C. fue objeto de adoración como si se tratase de una imagen de la diosa Cibeles. El año 218 a.C., un oráculo declaró que los cartagineses serían vencidos si la piedra era traída a Roma. En poco tiempo, el meteorito fue arrebatado al rey frigio y transportado a Roma con gran pompa, donde, gracias a su supuesta contribución a la victoria romana, siguió siendo venerado durante más de 500 años. Los primeros testigos de las caídas de estos objetos no dudaron en embellecer sus narraciones, atribuyendo a los meteoritos todo tipo de orígenes sobrenaturales. El año 1400 un meteorito de hierro de unos 106 kilos de peso cayó cerca de Elbogen, en Bohemia: ¡se creyó que eran los restos metamorfoseados de un tirano local! De cualquier modo, los científicos no empezaron a atribuir el fenómeno a causas naturales hasta después de la caída de un meteorito en Benares, la India, el año 1798.

En abril del año 1803 se efectuó en L'Aigle, Francia, el primer estudio científico acerca de una granizada de piedras celestes. La Academia de Ciencias de París envió a L'Aigle un comité investigador dirigido por el físico Biot. Según su informe, el día 25 de abril de 1803, aproximadamente a la una del mediodía, la mayoría de habitantes de la localidad vieron cómo se desplazaba en el aire a gran velocidad una esfera de llamas extremadamente luminosa. Al cabo de unos instantes se produjo una violenta explosión que duró unos 5 ó 6 minutos y que pudo ser oída en todas direcciones hasta 80 kilómetros a la redonda. La explosión consistió en tres o cuatro detonaciones parecidas a cañonazos seguidas por una descarga parecida a un fuego graneado de fusilería y, por último, un ensordecedor retumbar de tambores. Este ruido procedía de una pequeña nube alargada situada a unos 2 kilómetros hacia el NNO de la ciudad de L'Aigle. El centro de la nube se mantuvo estacionario mientras duró el fenómeno; únicamente las sucesivas explosiones esparcieron por todos los lados los vapores que la componían. La nube debía tener una altura considerable, ya que pudo ser vista por los habitantes de diversos pueblos situados a más de 5 kilómetros de distancia el uno del otro. En toda la zona próxima a la nube se oyeron unos silbidos parecidos a los que deben producirse cuando se lanzan piedras con una catapulta; al mismo tiempo, un chaparrón de meteoritos sólidos cayó sobre el suelo. Los más grandes llegaron a pesar 8,5 kilos, mientras que los más pequeños no pasaban de unas pocas decenas de gramos. Se calcula que el número total de meteoritos que cayeron en L'Aigle fue de unos 3.000. Biot demostró claramente que los meteoritos son piedras que caen sobre la Tierra procedentes del espacio, y que no deben ser confundidos con las piedras normales vitrificadas por los rayos. Ésta era la opinión más extendida entre sus contemporáneos, quienes, a diferencia de los antiguos, estaban dispuestos a creer en un origen extraterrestre.

Aproximadamente cien años más tarde, otro evento claramente extraterrestre de mucha mayor violencia se produjo en el Asia soviética. El día 30 de junio de 1908 hacía una mañana fría y clara a orillas del río Tunguska, cerca del lago Baikal, en Siberia. Algunos miles de personas que vivían en la región situada entre el Yenisei, el Lena y el ferrocarril transiberiano fueron testigos de la caída de una gigantesca bola de fuego en dirección al noroeste; tras de sí la bola arrastraba a través del cielo una densa nube de polvo. A continuación se oyeron fuertes truenos y un terrible estallido. La bola chocó contra el suelo, cerca del Tunguska, a las 7.17, hora local. Los microbarógrafos y los sismógrafos situados en áreas tan alejadas como Inglaterra detectaron terremotos y ondas de choque. Las explosiones fueron oídas hasta a 1.000 kilómetros de distancia. Hombres y caballos fueron derribados y los cristales de las ventanas se rompieron en un radio de

Tabla 7-2. Datos acerca de algunos cráteres de impacto meteorítico (comprobados) existentes en la Tierra

Nombre y localidad	Tamaño (diámetro mayor)	Número de cráteres
Barringer o Meteor Crater, Arizona	1.200 m	1
Lonar, India	1.097 m	1
Wolf Creek Crater, Australia occidental	850 m	1
Aouelloul, Mauritania	250 m	1
Boxhole, Australia	175 m	1
Odessa, Texas	168 m	3
Henbury, Australia	150 m	14
Oesel Craters, Estonia (URSS)	110 m	7
Wabar, Arabia Saudí	90 m	2
Campo del Cielo, Argentina	70 m	9
Sikhote Alin, Primorye Ter, Siberia (URSS)	26,5 m	22
Dalaranga, Australia occidental	21 m	1
Haviland, Kansas	11 m	1
Más otros muchos cráteres menores y más efímeros		

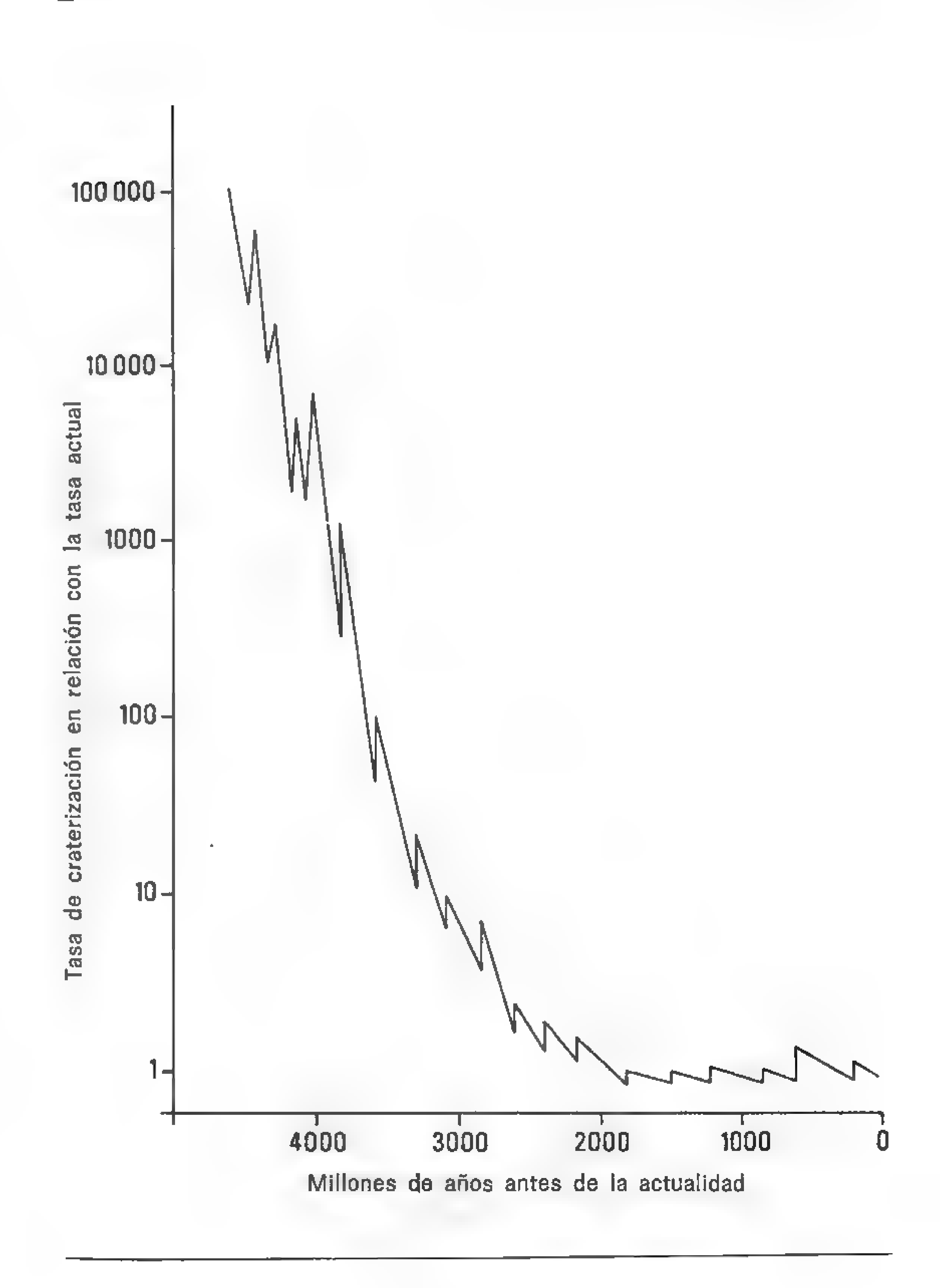
160-240 kilómetros. En los lugares más cercanos al impacto, la gente quedó inconsciente. En los ríos se formaron grandes olas y muchas casas y muros se derrumbaron. La columna de fuego que se levantó en el punto del impacto podía ser vista desde 400 kilómetros de distancia; dicha columna alcanzó una altura de más de 20 kilómetros sobre el suelo. Un convoy del transiberiano que circulaba a más de 600 kilómetros de distancia fue detenido por su maquinista cuando éste vio que las vías se levantaban y eran sacudidas delante de la máquina. En el lugar del impacto, el bosque quedó carbonizado instantáneamente. Los árboles fueron arrancados de raíz y tumbados radialmente por el interior de una zona de 30 a 50 kilómetros a la redonda; los troncos caídos quedaron orientados en dirección al foco del impacto. Durante las noches que siguieron al impacto, los cielos de Europa y del noroeste de Asia estuvieron iluminados por brillantes nubes de polvo parecidas a las que habían sido observadas después de la explosión de Krakatoa, en el año 1883.

Lo alejado del lugar y la revolución y guerra civil rusas retrasaron el envío de un equipo científico hasta el año 1927. Los restos del supuesto meteorito no fueron nunca hallados; únicamente aparecieron bolitas fundidas —cuyo origen era aparentemente terrestre— incrustadas en el suelo como granos de uva. En consecuencia, algunos investigadores consideraron que el meteorito se había vaporizado por completo y explotó a raíz del

impacto. En el área central no se descubrió ningún gran cráter, aunque sí muchos pequeños cráteres cuyo diámetro oscilaba entre 9 y 46 metros. Desde entonces se han hecho muchas hipótesis acerca de las características del cuerpo extraterrestre que se estrelló a orillas del Tunguska. Según una de estas hipótesis, se trataría de un enorme meteorito que pesaría varios miles de toneladas y que habría explotado antes de tocar el suelo. Probablemente, la violencia explosiva del evento no se parecía en nada a los fenómenos normalmente asociados con los pequeños impactos meteoríticos. Otra hipótesis es que lo que colisionó contra la Tierra pudo ser un cuerpo de antimateria o un vehículo espacial nuclear de origen desconocido. La ausencia de cualquier traza de radiación parece descartar la última posibilidad; sin embargo, varios especialistas han considerado seriamente la posibilidad de que se tratase de una colisión con antimateria. De todos modos, a partir del análisis de las descripciones efectuadas por los testigos del acontecimiento, la explicación correcta parece ser la habitual —es decir, era solamente un gran meteorito que cayó sobre la superficie de la Tierra siguiendo una trayectoria de muy bajo ángulo que determinó su vaporización prácticamente total antes del impacto. Desde luego, un ángulo de aproximación tan bajo podría corresponder a una gran onda de choque de trayectoria balística, responsable principal de la amplia zona de los daños causados. Otra hipótesis muy atractiva es la que atribuye el impacto a un pequeño cometa. Esta hipótesis permitiría explicar satisfactoriamente la gran velocidad con que llegó el cuerpo extraterrestre y la ausencia de restos meteoríticos identificables como tales, puesto que los cometas están compuestos principalmente por hielo, gas y polvo.

En el informe final de la investigación llevada a cabo por el Comité de Meteoritos de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, hecho público el año 1960 por su presidente Vassily Fesenkov, se llegaba a la conclusión de que el evento del Tunguska había sido causado por el impacto de un pequeño cometa de varios kilómetros de diámetro y de aproximadamente un millón de toneladas de peso. Un cometa de estas características tendría unas dimensiones equivalentes a la millonésima parte de un cometa

Fig. 31. Curva que muestra la disminución progresiva de la tasa de craterización ▶ de la Tierra, la Luna y los planetas más próximos. El bombardeo fue muy intenso durante el período de crecimiento, hace unos 4.600 millones de años. A partir de ese momento, la tasa de craterización disminuyó rápidamente, aunque ocasionalmente la tendencia se invertía; las inversiones se producían cuando la Tierra chocaba con corrientes de planetesimales libres. El pico situado alrededor de los 4.000 años corresponde al período de formación de los mares lunares. La tasa de craterización cayó hasta un nivel próximo al actual hace aproximadamente 2.000 millones de años y desde entonces se ha mantenido en una rosca constante.



medio, pero, si como parece probable chocó contra la Tierra a una velocidad de más de 40 km/seg, la energía desplegada por tal impacto basta para explicar la devastación observada en el Tunguska. De todos modos, fuese cual fuese su verdadera naturaleza, lo que ocurrió en Siberia en 1908 es sin ningún género de dudas el mayor impacto científicamente estudiado durante la historia reciente de la Tierra. Si la colisión se hubiese producido tan sólo 4 horas y 47 minutos más tarde, ésta habría tenido lugar en San Petersburgo (la actual Leningrado); la ciudad hubiese quedado tan destrozada como si le hubiesen tirado varias bombas de hidrógeno. Según estudios recientes, la energía liberada en el evento del Tunguska equivale a una explosión de 30 megatones. Una de las preguntas fundamentales que se derivan de los hechos que acabamos de exponer es la siguiente: Si uno de esos grandes impactos extraterrestres se produjese hoy en día, destruyendo alguna ciudad como Washington, París o Moscú, ¿habría algo o alguien capaz de detener el holocausto nuclear de masiva represalia que sin duda se desataría inadvertidamente antes de que los gobernantes se apercibiesen del verdadero origen de la catástrofe?

En la actualidad no puede haber duda alguna acerca del origen extraterrestre del proyectil del Tunguska y del meteorito de hierro que excavó el cráter Barringer en Arizona. En el resto del mundo existen otros muchos cráteres parecidos, aceptados en todos los casos como el resultado de impactos meteoríticos. Uno de los más espectaculares es el Wolf Creek Crater, en el desierto australiano; este cráter fue descubierto desde el aire en 1947. Otra estructura de cráter, cuya edad es más o menos la misma que la del Meteor Crater de Arizona, está ocupada actualmente por el lago Chubb, en Ungava, en el extremo norte del Canadá, un lago azul pálido que rellena una depresión perfectamente circular que mide 3.500 metros de diámetro. En el mundo se han descubierto otros 50, o incluso más, cráteres causados por impactos meteoríticos relativamente recientes. Únicamente a partir de la constatación de la existencia de estos cráteres ya podemos afirmar que vivimos en un planeta sometido a un bombardeo constante. De hecho, todos nosotros estamos viajando a través del espacio como una tripulación a bordo de una nave espacial desarmada que está siendo sometida a un continuo y peligroso fuego de costado.

En el resto del sistema solar, parece ser que las colisiones con y entre cuerpos estelares, como los meteoritos y los asteroides, han contribuido de manera muy importante a moldear la superficie de los planetas y de sus satélites. Recientes exploraciones fotográficas han demostrado que extensas zonas de las superficies de Mercurio, Marte y la Luna están densamente salpicadas de cráteres. Al parecer, la principal fase de formación de cráteres en la Luna ocurrió entre 3.000 y 4.000 millones de años antes de la actualidad; asimismo, parece probable que las colisiones a gran escala fuesen muy frecuentes en los primeros momentos de la historia de los planetas. También se ha dicho que algunos de los rasgos estructurales conservados en los viejos escudos precámbricos de la corteza terrestre no son sino las reliquias de antiguas cicatrices de impactos, ocurridos durante las intensas colisiones de los primeros tiempos de la historia de la Tierra. Sin embargo, la exploración espacial de la Luna y de los planetas más próximos confirma la continuación de los impactos y de la caterización hasta nuestros días, aunque, eso sí, a una tasa mucho menor.

¿Cuál es el origen de este bombardeo perpetuo, y de dónde proceden los meteoritos? Si contemplamos el sistema solar en su conjunto, nos daremos cuenta de que además de los nueve planetas mayores existen en él un número extraordinario de cuerpos menores, cuyos tamaños oscilan desde los de partículas de polvo apenas visibles hasta los de los asteroides o planetas menores, los cuales pueden tener varios centenares de kilómetros de diámetro. A pesar de que esos miembros menores de nuestro sistema solar sólo representan una pequeñísima parte de su masa total, el interés científico de los mismos como grupo es extraordinario; ellos son la causa principal de fenómenos como los cometas, las estrellas fugaces y las caídas de meteoritos y de muchos otros tipos de objetos planetesimales que caen sobre la Tierra de tarde en tarde. A diferencia de los nueve planetas mayores, que orbitan alrededor del Sol en la misma dirección y casi en el mismo plano (la eclíptica), los cuerpos menores siguen trayectorias más irregulares; sus órbitas pueden ser excéntricas o altamente inclinadas, y muchas ni tan siquiera tienen formas esféricas. Las trayectorias parabólicas o hiperbólicas seguidas por algunos cometas explican el hecho de que el Sol y su familia de planetas se encuentren con bastante frecuencia, en el curso de su viaje a través del espacio, con objetos procedentes del exterior del sistema solar. Sin embargo, la mayoría de fragmentos espaciales que caen sobre la Tierra proceden indudablemente del interior del propio sistema solar.

Las partículas independientes más pequeñas dentro del sistema solar forman la llamada "luz zodiacal", una tenue luminosidad que puede ser vista en las oscuras noches sin Luna; la luz zodiacal procede de millones de pequeñas partículas de polvo espacial que reflejan la luz del Sol. Los *cometas* son otro tipo de cuerpos astronómicos, de masa muy pequeña, que vagan por los helados confines del sistema solar, más allá de la órbita del más alejado de los planetas, Plutón. Los astrónomos calculan que hay, como mínimo, unos 100.000 millones de cometas orbitando no sólo en el plano disco de los planetas sino también en un halo esférico alrededor del sistema solar; este halo se extiende más o menos hasta 16^{12} kilómetros en dirección a las estrellas más próximas al Sol. Las regiones centrales del

sistema solar han sido visitadas por un número relativamente escaso de cometas; y eso es, en cierto modo, una lástima, porque es precisamente en esas regiones donde los astrónomos pueden estudiarlos mejor. No obstante, los que sí han llegado nos han revelado el sorprendente hecho de que están constituidos mayoritariamente por acumulaciones de polvo y gases helados, con unos diámetros de unos pocos kilómetros y con una densidad algo inferior a la del agua. En el espacio lejano los cometas no tienen cola; ésta sólo aparece cuando se aproximan al Sol, y ello es debido a que la energía solar irradiada por el astro rey vaporiza y expande las capas exteriores de los cometas, convirtiéndolas en sus largas y luminosas cabelleras. A pesar de su reducida masa, algunos cometas pueden ocupar un volumen en el espacio mayor que el ocupado por el propio Sol. Cuando un cometa se aproxima considerablemente al Sol, las corrientes de partículas solares pueden provocar importantes alteraciones en el mismo, haciendo aparecer bolsadas de gas explosivas en su esponjoso interior y estirando aún más su cola. El gran cometa del año 1843 tenía una cola que medía más de 800 millones de kilómetros. El brillo del cometa Halley, que pasa una vez cada 76 años, es tan extraordinario que todos sus pasos, excepto uno en 1066, han podido ser registrados en los anales de los astrónomos chinos y japoneses desde el año 204 a.C. Es uno de los mayores cometas que se conocen: su última aparición ha ocurrido en 1986. El astrónomo inglés Edmund Halley fue el primero en determinar que los cometas más visibles pertenecían al sistema solar, el cual cruzaban siguiendo órbitas elípticas. Probablemente, la mayoría de ellos son miembros originales de la familia solar que han estado orbitando desde tiempos inmemoriales alrededor de la región central del sistema solar. Probablemente la influencia gravitacional debida al paso de una estrella es lo que hace que algunos de ellos abandonen sus fríos y lejanos dominios para penetrar hasta el corazón del sistema solar. Un cometa puede limitarse a pasar a través del sistema solar, volviendo posteriormente a sus dominios, o bien puede quedar sujeto a la influencia gravitacional de uno de los planetas mayores, hecho éste que le obligará a seguir una órbita que le hará pasar periódicamente cerca del Sol.

La suerte que pueden correr los cometas que se acercan con demasiada frecuencia al Sol puede ser ilustrada mediante la fugaz y rápida carrera del cometa Biela, cuya primera aparición fue observada el año 1772. Este cometa reaparecía en las proximidades del Sol cada seis años y medio. Durante la aparición del año 1846, se partió inesperadamente en dos cometas que empezaron a moverse el uno al lado del otro. En 1852 volvió a aparecer bajo su forma doble; después, se desvaneció. Los astrónomos estuvieron todavía aguardando su paso durante 20 años, cuando en toda Europa pudieron verse repentinamente los fuegos de artificio provocados

por una lluvia de meteoritos que iban entrando en ignición a medida que alcanzaban la atmósfera terrestre. La lluvia de chispazos cósmicos fue incrementándose a medida que iba desplazándose hacia el oeste, y en Inglaterra la gente llegó a ver un centenar de meteoros incandescentes por minuto. Encima del Atlántico, los chispazos fueron haciéndose paulatinamente más escasos, cesando por completo en algún lugar situado encima del continente americano. Cuidadosos estudios han demostrado que aquellos meteoros eran en realidad los restos del cometa Biela que estaban cruzando la órbita de la Tierra en el preciso instante en que ésta pasaba por aquel lugar. Puede considerarse una suerte que el cometa Biela no chocase contra la Tierra la primera vez que apareció en las regiones interiores del sistema solar; téngase en cuenta que de no haber sido previamente desgastado, erosionado y roto por la influencia del Sol, el impacto del cometa original podría haber tenido consecuencias muy graves. El impacto de un núcleo cometario contra la Tierra liberaría una cantidad de energía cinética equivalente a la que liberaría un cuerpo de millones de toneladas de peso que viajase a una velocidad de varios centenares de kilómetros por segundo. La liberación de esta cantidad de energía probablemente se hubiera convertido en una explosión colosal. Cuando las cabezas y las colas de los cometas se hinchan debido a su excesiva proximidad al Sol, éstos devienen transparentes, pudiéndose ver las estrellas a través suyo; de hecho, en tal situación los cometas no están constituidos sino por una malla muy abierta de partículas de polvo, hielo y gas. La densidad de la cola de un cometa puede ser tan pequeña que unos 8.000 kilómetros cúbicos de la misma equivalgan a 0,016 litros de aire en la superficie de la Tierra. Los efectos atmosféricos del paso directo de la Tierra a través de una cola cometaria —tal y como ocurrió con el cometa Halley en 1910— serían, por tanto, prácticamente inapreciables, ya que tan sólo una ridícula cantidad de material cometario entraría en la atmósfera terrestre.

Los *asteroides* son los más grandes de entre los cuerpos menores del sistema solar; tienen formas irregulares y tamaños que oscilan entre algunos cientos de kilómetros de diámetro y unas decenas de metros. De entre los asteroides de mayor tamaño se han identificado unos 2.000, aunque en el sistema solar hay muchísimos más. Se cree que son los restos de un gran planeta que hubo en un tiempo más allá de Marte y que en algún momento se convirtió en miles de pequeños cuerpos irregulares; sin embargo, algunos asteroides pueden ser auténticos fragmentos de la materia solar primigenia, a partir de la cual se formaron por acreción los nueve planetas mayores. Entre Marte y Júpiter hay un gran cinturón de asteroides, aunque la masa total del cinturón es probablemente algo menos que el 5 % de la masa de la Luna.

El astrónomo italiano Giuseppe Piazzi fue el primero en identificar un asteroide; el hecho ocurrió la primera noche del siglo XIX. Piazzi pudo verlo durante 41 atardeceres seguidos, para perderlo finalmente cuando se aproximó demasiado al área del cielo ocupada por la luz crepuscular del Sol. En toda Europa otros astrónomos lo estuvieron buscando inútilmente. Cuenta la leyenda que durante una batalla, Napoleón discutió con uno de sus oficiales acerca del nombre que debería darse al asteroide si volvía a ser avistado. El genial matemático alemán Karl Friedrich Gauss, que tenía una gran debilidad por la aritmética astronómica, dejó todo lo que estaba haciendo en aquellos momentos y, basándose únicamente en las escasas observaciones de Piazzi, pudo reconstruir la órbita seguida por el objeto perdido. Con los resultados de Gauss en sus manos, otros astrónomos empezaron a escudriñar el cielo dirigiendo sus telescopios hacia el lugar correcto y volvieron a descubrir, con bastante seguridad, el pequeño planeta perdido. Piazzi lo bautizó Ceres y mediciones posteriores han demostrado que se trata de una masa rocosa de 770 kilómetros de diámetro. Ceres fue el primer asteroide en ser descubierto y, además, es el mayor de todos ellos. Otros fueron descubiertos en rápida sucesión: Palas, de 480 kilómetros de ancho, en 1802; Juno, de 190 kilómetros de diámetro, en 1804; y Vesta, de 380 kilómetros de diámetro, en 1807. En 1977 se descubrió un nuevo gran asteroide, con una anchura de 640 kilómetros, orbitando entre Júpiter y Saturno; se le llamó Quirón. Aún deben quedar muchos de estos pequeños planetas por descubrir. Actualmente se cree que existen unos 30.000 asteroides de un cierto tamaño, cuyas dimensiones van desde las del respetable equidimensional Ceres hasta las pequeñas masas de rocas volantes como Ícaro, cuyo diámetro es de tan sólo un kilómetro y medio.

Se calcula que el número total de asteroides del tamaño de un canto, una china, o incluso un grano de arena es del orden de varios miles de millones. De ellos, 1.600 aproximadamente han sido estudiados lo bastante cuidadosamente como para que puedan trazarse sus órbitas y calcularse sus futuras trayectorias. Cada uno de ellos gira alrededor del Sol en el mismo sentido que la Tierra y el resto de planetas, de oeste a este. Puesto que la mayoría de ellos se mueven dentro de una estrecha banda situada entre Marte y Júpiter, es el enorme Júpiter quien controla sus movimientos. De vez en cuando Júpiter permite que alguno de los asteroides realice una serie de viajes orbitales hacia el interior o el exterior del sistema solar, es decir, hacia el Sol o hacia los planetas exteriores, respectivamente. La actual órbita de Ícaro hace que éste pase muy cerca del Sol y de los planetas interiores; la última vez que pasó cerca de la Tierra, en 1968, únicamente estaba a una distancia equivalente a 16 veces la distancia de nuestro planeta a la Luna. Hidalgo da vueltas y vueltas más o menos a la misma distancia que Saturno; Eros, una masa de rocas en forma de cigarro, de 24 kilómetros de largo y 8 de ancho, sigue una órbita que puede llegar a acercarle a tan sólo 22,4 millones de kilómetros de la Tierra. Amor, Apolo y Adonis pueden pasar incluso más cerca. En marzo de 1978, un asteroide de un kilómetro y medio de diámetro, perteneciente al grupo de Apolo, pasó a tan sólo 12,8 millones de kilómetros de la Tierra. En 1937, Hermes (también con un diámetro aproximado de un kilómetro y medio) pasó tan cerca que la tarea de seguirle se convirtió para los astrónomos en algo parecido a lo que hacen los controladores aéreos cuando intentan seguir un avión. En el momento de mayor proximidad estuvo a sólo 640.000 kilómetros de la Tierra, el doble de la distancia que hay hasta la Luna. Ocho asteroides de este rango de magnitud siguen trayectorias que cruzan la órbita terrestre; por tanto, es obvio que existe la posibilidad de que algún asteroide o pequeño planeta se acerque lo suficiente para que colisione con la Tierra.

La caída sobre la Tierra de grandes masas de material extraterrestre se produce una vez cada 1 a 50 millones de años. Cuando eso ocurre, la Tierra puede comportarse como fango blando y acoger explosivamente al cuerpo celeste en su seno; también puede ocurrir que el cuerpo espacial se vaporice y se disperse por completo en medio de una terrible explosión. Los geólogos apenas han empezado a identificar las cicatrices dejadas en la superficie de la Tierra por el impacto de grandes meteoritos y asteroides. Todas las evidencias acumuladas hasta ahora parecen indicar que sin el escudo protector de la atmósfera y los océanos y sin la capacidad cicatrizadora de la erosión, la sedimentación, los procesos orogénicos y la vegetación, la superficie de la Tierra presentaría un aspecto tan agujereado como el de la Luna.

Sabemos, a través de numerosas observaciones científicas directas, que la Tierra está siendo bombardeada constantemente por un gran número de cuerpos extraterrestres de pequeño tamaño, los meteoritos. La cantidad de ellos que penetra diariamente en la atmósfera es del orden de varios miles. La mayoría se queman, convirtiéndose en meteoros, mucho antes de que alcancen la superficie de nuestro planeta. De hecho, cada año sólo se recuperan unos 10 meteoritos caídos sobre la Tierra. Los meteoritos tienen un atractivo especial porque, aparte de las rocas lunares traídas por las misiones Apolo y Luna, son las únicas muestras de rocas del espacio interplanetario que han podido ser estudiadas por los científicos. Se cree que la mayoría de meteoritos están relacionados en su origen con los asteroides, no siendo más que pequeños fragmentos de los mismos cuerpos parentales, de los que se han desprendido en el curso de colisiones o han sido lanzados en órbita como lluvia de fragmentos más pequeños. Su interés geológico es muy elevado, ya que su composición puede ser parecida a la

Tabla 7-3. Algunos bólidos y meteoritos observados en 1976

Fecha	Lugar	Descripción
18 ene.	Bristol, Virginia, EE.UU.	Un brillante bólido visible durante 15 segundos en dirección 20.30 EST, acompañado de una fuerte detonación que hizo vibrar las ventanas. Durante algunos minutos persistió una cola de humo
28 ene.	Gujurat, India	Un brillante fogonazo y varias fuertes detonaciones, a las 21.00 GMT. Se recuperaron varios fragmentos de un meteorito pétreo, con un peso total de 4,5 kg
11 feb.	URSS y Finlandia	Un brillante bólido en dirección al SE, observado alrededor de las 15.50 GMT en una amplia región que incluía Tallin, Leningrado, Kalinin, Novgorod y Pskov
8 marz.	Provincia de Kirin, República Popular de China	Un brillante bólido en dirección al SO, desplazándose a una velocidad de 13,6 km por seg, que explotó en medio de una tremenda detonación sobre la Provincia de Kirin a las 15.02 (hora local). La lluvia subsiguiente de meteoritos pétreos fue una de las más intensas de la historia. Los fragmentos quedaron repartidos en un área de 520 kilómetros cuadrados. Se recuperaron más de 100. El más grande pesaba una tonelada y tres cuartos y es el mayor meteorito pétreo que se conoce. Cayó en la comuna de Huapi, en Yungchi, atravesando una capa de 1,8 metros de suelo helado y hundiéndose 6,4 metros en el suelo. El impacto envió fragmentos de rocas hasta más de 90 metros del cráter, cuya profundidad superaba los 3 metros
21 abr.	Cornualles y Devon, Inglaterra	Un brillante bólido en dirección NE, visto por observadores situados a 320 kilómetros de distancia
21 abr.	URSS	Un brillante bólido desplazándose de N a S a gran altura iluminó la superficie del océano en las proximidades de Lyra, a las 08.21 GMT
5 jun.	Checoslovaquia	A las 15.43 UTC se vio cómo un brillante bólido se partía en dos, recortándose contra el cielo a la luz del día

Tabla 7-3. *(continuación)*

Fecha	Lugar	Descripción
6 jun.	Inglaterra	Un espectacular bólido fue visto sobre la costa oriental de Inglaterra, desde Margate hasta Lowestoft, a las 21.34 UTC. Mientras se desplazaba hacia el E, sobre Felixstowe, en Suffolk, y durante 4 segundos, numerosos fragmentos se desprendieron del bólido y fueron arrastrados por el mismo. Por último, dejaron de verse rastros de arrastre, fragmentación o chispas, siendo únicamente visible el cuerpo principal del bólido. El color dominante era el blanco, aunque mientras tenía lugar la fragmentación pudieron verse tonalidades rojas y azules. Dos minutos y medio después de haber sido observado el bólido, se oyeron varias detonaciones parecidas a truenos
18 jul.	Deephaven, Minnesota, EE.UU.	A las 02.25 UTC fue avistado por espacio de unos 2 segundos un brillante bólido verde en dirección al NNE. La larga cola brilló con una intensidad constante mientras duró el vuelo (desde 45° hasta 10° por encima del horizonte). El bólido era tan grande como la mitad de la Luna llena, pero no estuvo acompañado por ningún tipo de ruido
24 ago.	California, Nevada y Arizona, EE.UU.	Un brillante bólido blanco-verdoso desplazándose de S a N pudo ser observado por espacio de 5-10 segundos, aproximadamente a las 23.25 PDT, por encima de ciertas zonas del Oeste americano. Cuando fue avistado estaba situado a unos 150 kilómetros de altura; después cayó hasta unos 13 kilómetros de altura y explotó, dando lugar a una lluvia multicolor de fragmentos que, en su mayor parte, debieron caer en los bosques del Yosemite National Park. Las personas que se hallaban en el parque dijeron haber visto un fogonazo lo bastante brillante para despertar a quienes estaban durmiendo, haber oído una bomba sónica, y haber contemplado una cola de humo

Tabla 7-3. *(continuación)*

Fecha	Lugar	Descripción
3 sep.	Sur de California, EE.UU.	Un bólido de colores de tamaño equivalente a un cuarto de la Luna llena cruzó el cielo del sur de California de E a O, aproximadamente a las 08.15 PDT
20 sep.	Nuevo México, EE.UU.	Un bólido blanco fue observado por espacio de 2-3 segundos, y alrededor de las 20.07 MDT, desde el Sacramento Peak Observatory. Un fogonazo azul, más brillante que un rayo, se produjo poco después de que el bólido desapareciese entre las nubes. Detrás del bólido pudo verse claramente una cola de humo
27 sep.	América Central	Un brillante bólido fue observado por espacio de 15 segundos desde El Salvador, Honduras, Nicaragua, Guatemala y sur de México, aproximadamente a las 20.50 hora local. Dos minutos más tarde le siguió una bomba sónica
4 oct.	Beaufort, Carolina del Norte, EE.UU.	Un brillante bólido verde, tan luminoso como la Luna llena, fue observado por espacio de unos 2 segundos viajando de ONO a ESE, aproximadamente a las 19.01 EDT
10 oct.	Polonia	Un brillante bólido fue avistado desplazándose de E a O a través del sudoeste de Polonia, alrededor de las 17.30 hora local
13 oct.	Ruanda	A las 16.30 hora local se oyeron dos fuertes explosiones seguidas de un ruido parecido al que hace un avión a reacción; el fenómeno fue percibido en un radio de 24 kilómetros a partir de Ruhobobo, en la prefectura de Ruhengeri. Poco tiempo después cayó sobre el suelo un pequeño meteorito de medio kilo de peso, a 2 metros escasos de dos hombres que se hallaban en la aldea
19 dic.	Oeste de los EE.UU.	Un bólido rojo-anaranjado con una cola azul fue avistado desde Nebraska, Wyoming, Colorado y Nuevo México, aproximadamente a las 18.10 hora local. El mismo se desplazaba de NNW a SSE



Fig. 32. Situación de algunos de los cráteres de probable impacto meteorítico y de los posibles astroblemas existentes en Norteamérica. La identificación fiable de los astroblemas entraña a menudo serias dificultades, pero a medida que avanzan las investigaciones geológicas, va incrementándose sin cesar el número de estructuras atribuidas a impactos meteoríticos.

de los materia les que existen en las regiones más profundas de la Tierra, en el núcleo y el manto. A grandes rasgos, hay dos categorías principales de meteoritos: los "sideritos" o meteoritos de hierro y los "aerolitos" o meteoritos pétreos.

Los sideritos están compuestos principalmente por una mezcla de hierro y níquel, distinta de todas las que se hallan en las rocas terrestres y lunares; al parecer, se han formado en un ambiente muy reductor, en el que el hierro y el níquel se hallan mayoritariamente en estado metálico; se cree que su composición es muy parecida a la de los materiales que constituyen el núcleo de la Tierra. Las texturas de los minerales que integran los sideritos sólo pueden haberse formado en el curso de un enfriamiento muy lento a partir de un estado de fusión original, parecido al que probablemente existe en el interior de los planetas y de los grandes asteroides. Los sideritos tienden a no fragmentarse cuando cruzan la atmósfera terrestre, y generalmente suelen hallarse en forma de cuerpos mayores que los aeroli-

tos. Así, por ejemplo, en Oregón se halló un meteorito que pesaba 14,5 toneladas; otros dos que pesaban 11 y 17 toneladas, respectivamente, fueron hallados en México; en Groenlandia se descubrió uno de 34 toneladas de peso; en Adrar, Mauritania, se ha citado un bloque de origen problemático que pesa alrededor de un millón de toneladas. El mayor siderito de origen extraterrestre probado es el de Hoba, en Sudáfrica, de más de 60 toneladas de peso. Los dos mayores meteoritos pétreos conocidos son el de Norton County, en Kansas, EE.UU., de una tonelada de peso y descubierto en 1948, y el del condado de Yungchy, en la República Popular de China, de una tonelada y tres cuartos, descubierto en marzo de 1976.

Los *meteoritos pétreos* contienen a menudo pequeños agregados esferoidales de minerales, distintos de todos los existentes en las rocas terrestres; las piedras que contienen estas esférulas reciben el nombre de *condritas*, mientras que aquellas que no presentan dichos agregados se llaman *acondritas*. Las condritas son el tipo más común de meteoritos, representando más del 80 % de todos los meteoritos hallados. Están compuestas fundamentalmente por olivino, piroxenos y níquel-hierro y, en ciertos aspectos, pueden ser comparadas con las rocas plutónicas básicas (de origen profundo) del grupo de las peridotitas. Unas pocas condritas contienen cantidades considerables de compuestos orgánicos de origen extraterrestre; son las llamadas condritas carbonáceas, constituidas fundamentalmente por serpentina, silicatos de níquel y sulfitos. Las acondritas forman un grupo de meteoritos mucho más pequeño; en general, son más cristalinas que las condritas y presentan similitudes texturales y de composición con algunas rocas ígneas terrestres, como la dolerita y el basalto. Es muy raro encontrar grandes meteoritos pétreos; muy pocos llegan a pesar más de 450 kilos, y la mayoría ni siquiera se acercan a este peso. Al parecer, en el espacio constituían masas de mayor tamaño y por lo regular se fragmentaron con facilidad mientras cruzaban la atmósfera terrestre y al chocar contra el suelo. Existe un pequeño número de meteoritos, los "siderolitos", que contienen aproximadamente las mismas proporciones de silicatos y de níquel-hierro. La amplia gama de tipos químicos y mineralógicos de meteoritos parece indicar que no todos ellos proceden del mismo tipo de cuerpo padre, sino que más bien procederían de cuerpos asteroidales con características distintas y tamaños diversos. Muchas condritas presentan indicios de haber sufrido un recalentamiento hasta temperaturas de 800 °C o incluso más —probablemente, el grado exacto de recalentamiento está controlado por el tamaño de los cuerpos padre. Otras condritas, que no presentan ninguna evidencia de haber sufrido un recalentamiento, proceden probablemente de cuerpos parenterales más pequeños. Prácticamente todos los meteoritos tienen una edad de 4.600 millones de años; se cree que esto es debido a

que los eventos más importantes en la génesis de los cuerpos meteoríticos parentales a partir del material solar primigenio se produjeron en un intervalo de tiempo muy corto, quizás unos pocos cientos de años. En el transcurso de los últimos años, algunos científicos creen haber descubierto fósiles infinitesimales en los meteoritos o, cuanto menos, algo a lo que ellos denominan cautelosamente "materia organizada". Si esto fuese cierto, implicaría que la vida ya existiría en el Universo mucho antes del nacimiento del Sol y de su corte de planetas, y que la misma podría haber llegado a la Tierra desde más allá del sistema solar.

Tal y como ya hemos dicho antes, la caída de un meteorito puede ir acompañada por una brillante bola de fuego en el cielo y por efectos sonoros que han sido descritos como cañonazos, truenos, o como el ruido que se oye al rasgar un trozo de tela o al pasar un tren por un puente. De vez en cuando la Tierra se ve sometida a períodos de mayor actividad meteorítica; esto da lugar a la aparición de espectaculares estrellas fugaces en el cielo nocturno, que parecen ser irradiadas desde unos puntos determinados; sin embargo, estas lluvias meteoríticas raramente desembocan en la caída de material sobre la Tierra, ya que las mismas se deben a agrupaciones de pequeños cuerpos que arden por completo al entrar en nuestra atmósfera. Sólo unos pocos de los meteoros que se observan cada año dan lugar realmente a la caída de meteoritos sobre la Tierra. Por la noche, estos meteoros parecen brillantes bolas de fuego, más luminosas que la Luna y con unos trazos que a veces se pueden extender a lo largo de centenares de kilómetros. Generalmente, los meteoritos caen sobre la Tierra a velocidades relativamente bajas; esto es debido en parte al efecto de frenado de la atmósfera y en parte a que su velocidad ya es baja de por sí (en teoría no pueden desplazarse a más de 40 kilómetros por segundo, ya que cualquier velocidad superior a esta cifra les llevaría fuera del sistema solar). La mayoría de meteoritos son frenados por la atmósfera hasta el punto de que cuando caen hacia la superficie lo hacen a la velocidad de un cuerpo en caída libre; las altas temperaturas que alcanzan mientras atraviesan la atmósfera dejan huellas claramente visibles en los mismos, como, por ejemplo, una envuelta exterior fundida. La baja velocidad de impacto explica la relativa frecuencia con que se hallan grandes sideritos, incluso de varias toneladas de peso (incluso en suelo blando raramente penetran más de un metro y medio). Se ha calculado que todos los meteoritos que pesan menos de 10 toneladas pierden toda su velocidad cósmica al pasar por la atmósfera terrestre. Si llegan a velocidades mayores que las habituales, muy a menudo los meteoritos de tamaño medio a pequeño explotan o se fragmentan, ya sea en el cielo o directamente a consecuencia del impacto. Por tanto, de esto dependerá el que den lugar o no a la formación de cráteres de impac-

Tabla 7-4. Principales estructuras de impacto de la Tierra

Nombre, lugar y número de cráteres	Tamaño (diámetro mayor)	Categoría	Edad aproximada en millones de años
Astrones (se han propuesto más de 20), estructuras más o menos circulares que podrían ser el resultado de impactos de grandes planetesimales muy antiguos; distribuidos por todo el mundo.	160-3.200 km	Problemáticos	> 3.000
Bushveld, Sudáfrica (3)	Cada uno 112 km	Probable	2.100
Puchezh-Katun, Gorki, URSS	70 km	Posible	?
Popigay, Taymirskayiy-Yakut, URSS	64 km	Posible	?
Manicouagan, Quebec (Lámina 25)	64 km	Probable	220
Labynkyr, Yakut, URSS	59 km	Posible	?
Vredefort, Sudáfrica	56 km	Probable	2.100
Sudbury, Ontario	48 km	Probable	1.700
Siljan, Suecia	45 km	Probable	280
Charlevoix, Quebec	35 km	Probable	380
Lago Carswell, Saskatchewan	32 km	Probable	485
Manson, Iowa	29 km	Probable	135
Río Steen, Alberta	24 km	Probable	95
Ries, Alemania	24 km	Probable	15
San Martín, Manitoba	24 km	Probable	225
Gosses Bluff, Australia (TN)	22 km	Probable	130
Lago West Clearwater, Quebec	21 km	Probable	285
Lago Mistatin, Labrador	19 km	Probable	200
El'gygt-gyn, Chutotsk, URSS	17,6 km	Prácticamente seguro	1
Domo de Haughton, Canadá (TNO)	17,6 km	Posible	?
Strangways, Australia (TN)	16 km	Probable	280

Tabla 7-4. *(continuación)*

Nombre, lugar y número de cráteres	Tamaño (diámetro mayor)	Categoría	Edad aproximada en millones de años
Zhamanshin, Aktyubinsk, URSS	14 km	Posible	?
Lago East Clearwater, Quebec	14 km	Probable	285
Rochechouart, Francia	14 km	Probable	165
Crater Wells, Tennessee	14 km	Probable	200
Kilmichael, Mississippi	13 km	Posible	?
Sierra Madera, Texas	13 km	Probable	150
Lago Nicholson, Canadá (TNO)	13 km	Probable	350
Dellen, Suecia	13 km	Probable	280
Bahía de San Magnus, Shetland	11 km	Posible	?
Bosumtwi, Ashanti, Ghana	11 km	Probable	1,3
Des Plaines, Illinois	10 km	Posible	?
Lago Couture, Quebec	10 km	Probable	350
Lappajärvi, Finlandia	10 km	Probable	280
Janisjarvi, URSS	10 km	Posible	?
Deep Bay, Saskatchewan	10 km	Probable	100
Eagle Butte, Alberta	10 km	Posible	?
Elbow, Saskatchewan	8 km	Posible	?
Wanapitei, Ontario	8 km	Probable	280
Middlesboro, Kentucky	6 km	Probable	280
Serpent Mound, Ohio	6 km	Probable	280
Hartney, Manitoba	6 km	Posible	?
Decaturville, Missouri	6 km	Probable	500
Kentland, Indiana	6 km	Probable	280
Crooked Creek, Missouri	5 km	Probable	320
Köfels, Austria	5 km	Probable	1,5
Lago Mien, Suecia	5 km	Probable	280
Lago Pilot, Canadá (TNO)	5 km	Posible	350
Glasford, Illinois	5 km	Posible	?
Upheaval Dome, Utah	5 km	Posible	?
Brent, Ontario	5 km	Probable	450
Unnamed Lake, Canadá (TNO)	5 km	Posible	?
Flynn Creek, Tennessee	3 km	Probable	450
Nuevo Quebec, Quebec	3 km	Probable	0,15

Tabla 7-4. *(continuación)*

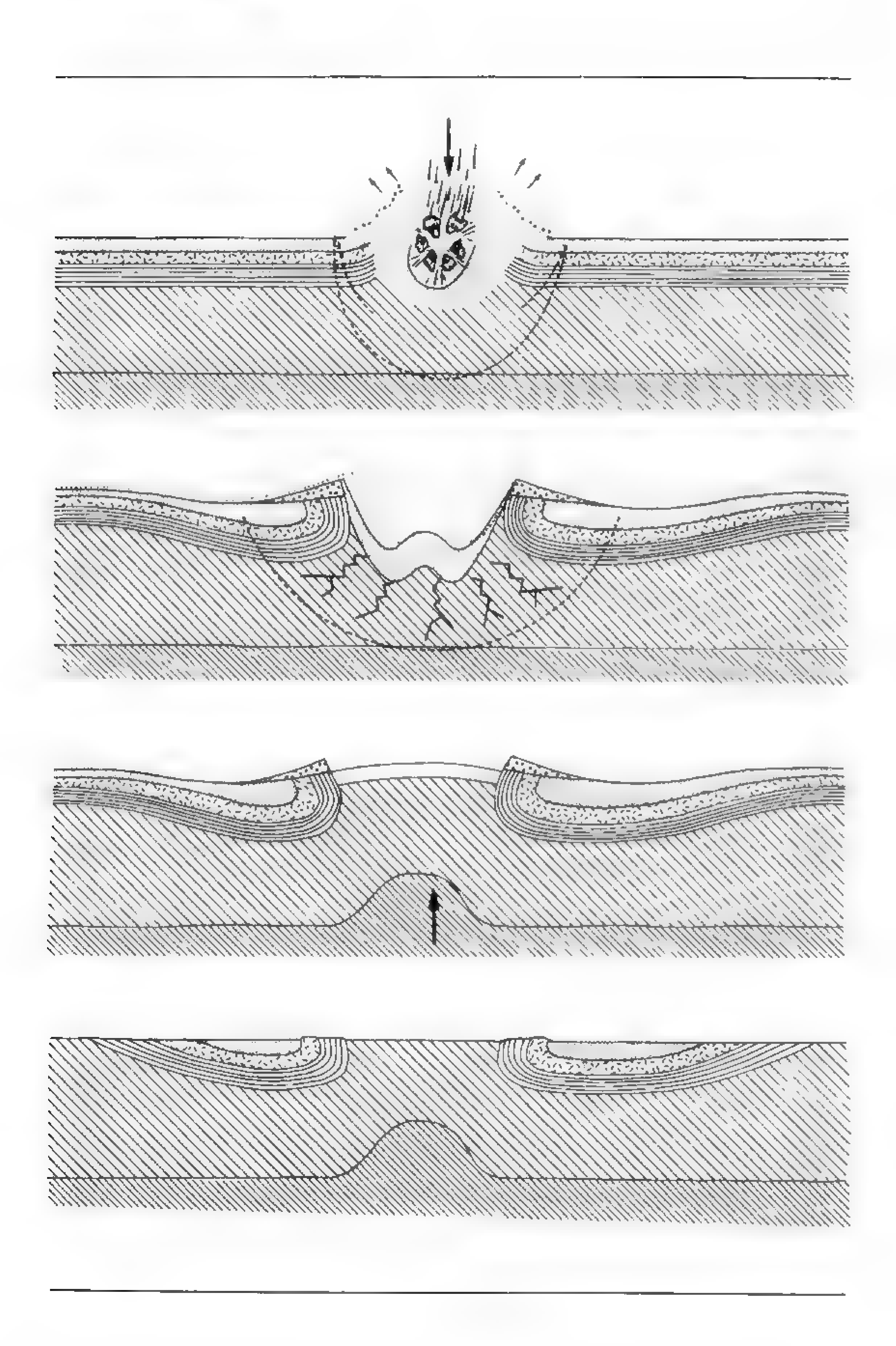
Nombre, lugar y número de cráteres	Tamaño (diámetro mayor)	Categoría	Edad aproximada en millones de años
Steinheim, Alemania	3 km	Probable	15
Lago West Hawk, Manitoba	3 km	Probable	150
Al Umchaimin, Irak	3 km	Posible	?
Gebel Dalma, Libia	3 km	Posible	?
Jeptha Knob, Kentucky	3 km	Posible	?
Lago Skeleton, Ontario	3 km	Posible	?
Lago Chubb, Ungava, Ontario	3 km	Posible	0,02
Más otros muchos cráteres y/o estructuras de impacto menores probables o posibles, y numerosas estructuras problemáticas de todos los tamaños.			

(Nota: Para saber con certeza absoluta si una estructura anular es de origen volcánico o meteorítico, el único remedio es perforar el subsuelo del cráter.)

to. Generalmente, estos cráteres están asociados con los sideritos; los cráteres pueden estar rodeados por pequeñas masas retorcidas de metal, los restos del meteorito. Los impactos muy rápidos son sin embargo poco habituales, ya que la mayoría de meteoritos y asteroides orbitan alrededor del Sol en el mismo sentido que los planetas, con sus órbitas generalmente próximas al plano de la eclíptica. Estos movimientos tienden a hacer que los meteoritos y asteroides sobrepasen a la Tierra, más que a favorecer colisiones frontales con la misma. Los grandes astroblemas y cráteres meteoríticos que han marcado la corteza terrestre deben por consiguiente representar colisiones con masas extraterrestres con pesos muy superiores a las 10 toneladas y que posiblemente impactaron contra la superficie de la Tierra conservando aún buena parte de su velocidad cósmica.

Las *tectitas* son unos pequeños cuerpos de vidrio de origen misterioso que se hallan en grandes cantidades en unas pocas zonas muy limitadas de la Tierra, casi todas ellas situadas en latitudes bastante bajas. Las principales zonas de tectitas son Checoslovaquia, Texas, Costa de Marfil, Australia y el Sudeste asiático. Todas las que se conocen han caído sobre la Tierra en tiempos geológicamente recientes y han sido identificados cuatro episodios distintos de llegada de tectitas. Su composición las diferencia de todos los vidrios volcánicos terrestres y de todos los materiales lunares y meteoríticos conocidos. Químicamente, son ricas en sílice y también tienen cantidades comparativamente elevadas de aluminio, potasio y calcio, y pequeñas proporciones de magnesio y sodio. Su origen ha sido un misterio durante años y ha despertado una infructuosa polémica, aunque por otro lado eso ha hecho que sean investigadas en todos sus detalles. Aún no se sabe si son de origen terrestre o extraterrestre. Algunas tectitas contienen burbujas de gas en cuyo interior hay vapor a una presión muy baja, equivalente a la existente a 29 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra. Los isótopos de argón presentes en los gases presentan unas proporciones típicas de la atmósfera terrestre, hecho que parece indicar que el vidrio debe haberse solidificado inicialmente en las partes superiores de la atmósfera terrestre. Además, no parecen haber sufrido el bombardeo de rayos cósmicos que cabría esperar si hubiesen pasado un intervalo de tiempo considerable en el espacio. Todas estas características, unidas a otras evidencias, parecen favorecer algún tipo de origen terrestre para las tectitas (podrían ser fragmentos de rocas fundidas expulsados de la zona de impacto de un gran meteorito o de un cometa, p. ej.). Sin embargo, también hay argumentos contrarios a esta opinión; su composición no es equiparable a ninguna roca terrestre conocida y, además, se cree que es aerodinámicamente imposible que unos cuerpos tan pequeños puedan ser expulsados y después devueltos a la superficie terrestre. También se han propuesto otros orígenes, como, por ejemplo, erupciones volcánicas en la Luna e impactos ocurridos en la superficie de ésta y que enviarían las tectitas muy lejos de la misma. En cualquier caso, las tectitas o bien representan una forma muy rara de material extraterrestre, o bien se han formado en la Tierra durante o a raíz de un impacto meteorítico o cometario contra la atmósfera o la superficie de nuestro planeta.

Existen cráteres meteoríticos en muchos lugares del mundo. Naturalmente, su origen es parecido al del cráter Barringer de Arizona. Además, en otros muchos lugares existen estructuras que quizá podrían ser atribuidas a impactos, aunque debido a la vejez de las cicatrices la erosión no ha dejado ninguna traza del suelo original y, en consecuencia, tampoco se pueden hallar en las proximidades de tales estructuras fragmentos meteoríticos que permitan confirmar un origen extraterrestre para las mismas. Una de las mayores cicatrices circulares de origen dudoso es la gigantesca estructura conocida como el domo o anillo de Vredefort, en Sudáfrica, formado hace unos 2.100 millones de años. Los geólogos han examinado detalladamente ese astroblema, perteneciente a un grupo de cuatro de ellos, pero que a diferencia de los restantes del grupo no está solapado por ninguno de sus vecinos. El centro de la estructura de Vredefort está ocupado por una masa de granito brechoide, fundido y retrabajado que mide 40 kilómetros de diámetro; esta masa central está rodeada por una gruesa faja de sedimentos precámbricos sobreinclinados e invertidos, altamente metamorfizados, de más de 15.000 metros de espesor, que se extiende sobre una zona hasta cinco kilómetros y medio de distancia a partir de los bordes del afloramien-



to granítico. Se cree que el granito ha sido levantado hasta la superficie a partir de una profundidad de al menos 14 kilómetros. Según algunos autores, el domo de Vredefort no es más que la subestructura de un gigantesco cráter meteorítico de explosión de 56 kilómetros de ancho por 16 kilómetros de profundidad; posteriormente, el basamento granítico removilizado sería empujado hacia arriba en la región central del cráter, obliterando cualquier traza del cráter original. Se ha calculado que para causar una cicatriz tan grande y profunda en la corteza terrestre sería necesaria una fuerza explosiva de más de 1,5 millones de megatones de TNT; está fuerza sería el resultado de la colisión con un asteroide o un planetesimal de más de 2 kilómetros de diámetro. Una variante de la hipótesis meteorítica postula que el cuerpo impactante habría perforado la corteza terrestre para acabar alojándose en el manto. El cuerpo granítico central y la orla sedimentaria de Vredefort están surcados por una auténtica red de vetas anastomosadas de *pseudotaquilita* negra, una roca de grano fino y de textura originalmente vidriosa que muy raramente se encuentra en otra parte de la corteza, y en ningún lugar en tanta abundancia como aquí. Se cree que la misma se ha formado a partir de la fusión de materiales corticales debido a las extremas

◀ **Fig. 33.** Corte esquemático de la corteza terrestre que ilustra la formación del astroblema de Vredefort, cerca de Johannesburgo, en Sudáfrica. El dibujo superior muestra el impacto de un meteorito gigante, hecho ocurrido hace unos 2.100 millones de años. Se formó un enorme cráter y el meteorito se rompió por completo y se licuó debido a la liberación explosiva de su propia energía cinética. Una potente onda de choque se propagó a través de las rocas corticales circundantes, rompiéndolas y brechificándolas, y dando lugar a la aparición de conos de fragmentos y vetas de roca fundida. Asimismo, se produjeron crecimientos de dos minerales silicatados de alta presión muy raros, la *coesita* y la *estistovita*. En el dibujo siguiente se ve como las capas de rocas sedimentarias situadas encima del basamento gneísico se plegaron y se invirtieron hacia el exterior del cráter. Una vez disipada la energía del impacto inicial, la corteza se recuperó y formó un domo central en el cráter. En el reborde del mismo se acumuló un grueso anillo de brechas de expulsión. Otros fragmentos más finos fueron cayendo gradualmente sobre una extensa área. De hecho, ningún lugar de la Tierra quedó libre de la caída de pequeños fragmentos y partículas procedentes del impacto. El tercer dibujo muestra la eventual desaparición del profundo agujero debido a la reinstauración del equilibrio isostático reflejada por un lento ascenso de la corteza debajo del cráter. El último dibujo muestra el actual anillo de Vredefort. Los procesos erosivos, que han estado actuando durante miles de millones de años, han nivelado las partes más prominentes de la estructura, obliterando cualquier evidencia directa del cráter primitivo y de la capa superficial de fragmentos; no obstante, el gran anillo de capas sedimentarias invertidas es aún claramente visible. Este anillo rodea un núcleo central de gneis sobrelevantados. Además, en las rocas circundantes aún pueden hallarse los conos de fragmentos y los minerales de alta presión producidos por el paso de las ondas de choque.

y súbitas presiones originadas por la onda de choque del impacto. Los "conos de fragmentos" *(shatter cones)*, estructuras rocosas indicativas de los impactos meteoríticos, son muy abundantes en todas las rocas del anillo de Vredefort. Otra prueba de la intensa presión ejercida es la profusión de rocas astilladas y aplastadas, así como la abundancia de fallas.

El cráter Barringer, en Arizona, y el domo de Vredefort, en Sudáfrica, son dos ejemplos contrapuestos de las estructuras llamadas astroblemas, las cicatrices de antiguos impactos de cuerpos cósmicos. Una se debe indudablemente al impacto de un gran meteorito, mientras que la otra se debe posiblemente al impacto de un cuerpo mucho mayor, del tamaño de un pequeño planeta o asteroide. Obviamente, existe una notable controversia acerca del origen de los astroblemas más grandes, puesto que únicamente se han hallado restos meteoríticos verdaderos en asociación con un pequeño número de estructuras. Sin embargo, esto no es tan sorprendente como pudiera parecer, ya que las masas de restos cósmicos de mayor tamaño, las que originarían cicatrices gigantes si impactasen contra la superficie de la Tierra, son muy poco sensibles al efecto de frenado debido a nuestra atmósfera, por lo que podrían llegar a velocidades extremas; unas velocidades tan altas provocarían la explosión y la vaporización instantáneas de la mayor parte del cuerpo cuando éste chocase contra el suelo. Existen dos raras variedades de sílice, la *coesita* y la *estistovita*, que al parecer se forman a raíz de los grandes impactos meteoríticos; son minerales que sólo se forman bajo presiones extremadamente elevadas y que no se producen naturalmente en la corteza en ninguna otra circunstancia. Además, existe otra serie de características propias de los cráteres de todos los tamaños y edades que muestran los efectos del metamorfismo de choque sobre las rocas circundantes. Los conos de fragmentos son superficies de fractura cónicas, cubiertas de estrías que se distribuyen radialmente a partir del eje del cono. Se desarrollan especialmente bien en las calizas, aunque también pueden encontrarse en otro tipo de rocas; su longitud puede oscilar entre unos pocos centímetros y varios decímetros. Estas estructuras sólo se hallan en rocas situadas en presuntos cráteres de impacto meteorítico, y se han hallado asociadas con, al menos, 20 grandes astroblemas. Están originadas por la brusca aplicación de intensas sobrepresiones sobre la roca huésped; la roca se contrae y se expande instantáneamente en respuesta a las ondas de choque generadas por el impacto, fracturándose de forma característica y dando lugar a los conos de fragmentos o astillas dirigidas hacia el punto de impacto. La formación de este tipo de conos requiere sobrepresiones del orden de 21.000 a 85.000 kilogramos por centímetro cuadrado, una cifra mucho mayor de la que puede ser alcanzada durante cualquier explosión volcánica, por ejemplo. Las rocas del interior de los cráteres de impacto generalmente presentan una *brechificación* intensa; es decir, están rotas en una gran cantidad de fragmentos angulosos cuyos tamaños varían desde grandes cantos hasta finas partículas de polvo; las rocas brechificadas se presentan en el interior del cráter en forma de masas caóticas y también suelen constituir una capa de fragmentos expulsados del cráter que recubre los alrededores del mismo. En algunos lugares las brechas están cruzadas por filoncillos o están cementadas por vidrio rocoso, formado a raíz de la fusión total de algunas de las rocas existentes en el punto de impacto. En la parte más profunda de algunos cráteres se puede encontrar una balsa de roca fundida durante el impacto. Entre las brechas también pueden hallarse bombas vítreas, de aspecto similar a las bombas volcánicas, producidas durante las erupciones volcánicas, y también se pueden hallar alrededor de los cráteres.

A menudo, la identificación inicial de un cráter de impacto se debe al contorno circular que el mismo suele presentar en un mapa geológico o visto desde el aire. A pesar de su contorno circular respecto al centro, los bordes de los grandes cráteres pueden estar oscurecidos por estructuras geológicas preexistentes en la roca primitiva, o bien pueden ser cubiertos por sedimentos posteriores, o bien pueden ser destruidos por la erosión. Una de las mayores estructuras calificadas como un astroblema es el cráter de El'gygt-gyn, en el norte de Siberia, el cual fue identificado a partir de fotografías de satélite. Este cráter tiene unos 18 kilómetros de diámetro; su reborde está señalizado por un anillo de montañas que en su parte más alta se levantan más de 400 metros por encima del nivel de las aguas del lago que actualmente ocupa la parte central del cráter. Este tipo de rebordes tan marcados únicamente se encuentran en cráteres simples y relativamente recientes. En cráteres más antiguos o más complejos, el reborde ha sido o bien destruido por la erosión, o bien se ha desmoronado convirtiéndose en un umbral hundido, o bien está representado por un surco periférico. Los cráteres complejos o múltiples de más de un kilómetro de diámetro también suelen presentar un área central levantada, formada por la reacción elástica de las rocas situadas debajo del punto de impacto. La detonación artificial a nivel del suelo de grandes esferas de TNT también ha dado lugar a la formación de estructuras muy parecidas; estos experimentos parecen demostrar que algunos grandes astroblemas complejos pueden ser debidos al impacto de cuerpos cometarios que, al mismo tiempo que generarían tremendas ondas de choque en la superficie, quedarían volatilizados por completo a raíz del choque.

Una de las características geofísicas asociadas con los grandes cráteres de impacto es una anomalía gravitacional negativa típicamente situada encima del cráter, y que indica la presencia de rocas de baja densidad en el

subsuelo; esta anomalía suele ser particularmente evidente en los cráteres de tamaño medio. Las rocas del cráter también suelen presentar velocidades sísmicas inferiores a las de las rocas circundantes; ello es debido a su estructura caótica. Sin embargo, cuando un proyectil extraterrestre grande y pesado ha sido engullido por la Tierra, es de esperar que haya una anomalía gravitacional positiva y unas mayores velocidades sísmicas.

Hasta el presente se han identificado con suficientes garantías más de 50 grandes astroblemas. Probablemente, este número irá aumentando durante los próximos años, fundamentalmente debido a la investigación de estructuras de impacto problemáticas cuyos diámetros van desde centenares de kilómetros hasta unas pocas decenas de metros; en algunas de estas estructuras existen claros indicios de metamorfismo de choque, pero en ninguna de ellas han sido hallados restos meteoríticos. Sin embargo, cualquier listado de los astroblemas terrestres pecará forzosamente por defecto, ya que no tenemos ni la más mínima idea acerca del número de impactos ocurridos debidos al bombardeo extraterrestre de nuestro planeta, puesto que no tenemos constancia alguna de los que se han producido en las áreas oceánicas y, además, muchos de los astroblemas de las áreas continentales deben estar actualmente enterrados bajo sedimentos más jóvenes. En el sur de Alemania existen dos probables estructuras de impacto, las cuencas de Ries y de Steinheim, a 35 kilómetros. La cuenca de Ries es una depresión circular de 24 kilómetros de diámetro, con un reborde de colinas que se levantan 90 metros por encima de la llanura central; tiene una edad aproximada de 15 millones de años. A pesar de que casi toda la parte central del cráter está cubierta por sedimentos lacustres posteriores, aún aflora una gruesa capa de *suevita* que alcanza los 365 metros de espesor; la suevita es una brecha muy rica en estructuras de choque. También se presenta como un depósito "caído" en los alrededores del cráter, hasta una distancia de 16 kilómetros a partir de su reborde. Esta roca está constituida por fragmentos de la roca cristalina encajante, de minerales y fragmentos de vidrio y por bombas vítreas, todo ello rodeado por una matriz pulverulenta de grano muy fino. En los fragmentos de roca impactada están presentes los dos silicatos de alta presión citados anteriormente, la coesita y la estistovita. Al parecer, la suevita se ha depositado en forma de una ardiente corriente de densidad piroclástica procedente de una columna eruptiva proyectada más o menos verticalmente desde el centro del cráter. Las bombas vítreas son materiales que se fundieron por completo durante el impacto, saliendo después despedidos dentro de la columna. También existen grandes depósitos de un tipo de brecha más normal, no impactado; en ella hay bloques de hasta 800 metros de diámetro, próximos al reborde del cráter, lo que da una idea de la fuerza del impacto. El reconocimiento geofísico del cráter ha mostrado la existencia de anomalías gravitacionales y magnéticas negativas, así como una complicada estructura sísmica infrayacente en el fondo del mismo. La cercana cuenca de Steinheim es aproximadamente de la misma edad que la cuenca de Ries, aunque tiene unas dimensiones mucho más reducidas: algo más de 3 kilómetros de diámetro, con un desnivel de unos 90 metros respecto a la llanura circundante. En el interior del cráter hay una área central levantada constituida por sedimentos caóticos, brechificados y fracturados en los que abundan los conos de fragmentos. Es posible que ambos impactos se produjesen simultáneamente, en el curso de un único evento durante el cual varios cuerpos cayeron sobre la Tierra.

Todos los cráteres cuyo origen meteorítico ha sido *aceptado* son geológicamente recientes —menos de 10 millones de años de antigüedad. Todas las estructuras de impacto *probables* y *posibles*, como las que acabamos de describir, además de otras muchas aún más antiguas, algunas de las cuales sólo presentan las características propias de la deformación por choque, han sido afectadas en mayor o menor medida por la erosión, por deformaciones subsiguientes y han sido recubiertas por rocas sedimentarias más recientes. Por tanto, no debe sorprendernos excesivamente la ausencia de restos meteoríticos en el interior o en los alrededores de tales estructuras de impacto, aunque eso no quiere decir en modo alguno que no hayan estado ahí en algún momento del pasado. Algunos geólogos han sugerido que las principales estructuras arcuadas de la corteza terrestre podrían estar relacionadas con antiguas estructuras de impacto. En su opinión, el promontorio occidental de África, varios sistemas montañosos arcuados, y algunas fosas oceánicas, como el arco de las Aleutianas y las Indias Orientales, podrían tener un origen relacionado con grandes cicatrices de impacto. Sin embargo, en tales circunstancias es difícil obtener pruebas concluyentes; es evidente que cuanto más antigua es una estructura de impacto, más enmascarada estará su forma original y más problemático será su origen. A pesar de todo, es bastante probable que algunas de las rocas más antiguas de la Tierra, los cinturones precámbricos de esquistos verdes de los antiguos escudos continentales, deban su existencia a grandes impactos ocurridos en los primeros tiempos de la historia de la Tierra, hace unos 4.000 millones de años. Las dimensiones de estas antiguas estructuras —denominadas *astrones*— indican que los cuerpos impactantes debieron de tener diámetros próximos a los 300 ó 500 kilómetros; un impacto de tales características hubiera determinado que el cuerpo extraterrestre fuese totalmente engullido por la Tierra, originando importantes fusiones en la corteza y el manto superior, las cuales a su vez desencadenarían una notable actividad volcánica en el interior del cráter. El resultado final serían grandes cicatrices de impacto parecidas a los mares de la Luna, rellenas por coladas de lavas

excepcionalmente ricas en minerales ferromagnesianos. Sin embargo, en un planeta móvil como la Tierra tales mares pronto serían obliterados por los procesos de plegamiento y alzamiento que se desarrollan en la corteza, los cuales convertirían las antiguas depresiones circulares rellenas de lava en cinturones de rocas volcánicas metamorfizadas. Algunos geólogos han llegado a proponer para tales cinturones un origen extraterrestre de esta naturaleza a partir del estudio de determinadas estructuras características de los cinturones de esquistos verdes de Swazilandia, Rodesia, Australia occidental, Groenlandia y otros lugares. Vale la pena señalar que dichos impactos, si es que realmente se han producido, debieron ocurrir aproximadamente en la misma época en que se formaron los extensos mares lunares.

Para tener una visión completa del tema, es necesario mirar más de cerca las estructuras de impacto existentes en la Luna y en los planetas más cercanos del sistema solar, todo ello a la luz de los nuevos conocimientos adquiridos a través de los programas de exploración espacial americanos y soviéticos. La superficie de la Luna ha sido intensamente estudiada desde los tiempos en que el astrónomo italiano Galileo empleó por primera vez en el siglo XVII el recién inventado telescopio astronómico. La idea de que los cráteres de la Luna fueron formados por los impactos meteoríticos surgió a comienzos del siglo XIX, y fue ampliamente desarrollada en 1892 por el geólogo americano Gilbert. Durante la primera mitad del siglo XX, prácticamente todo el mundo pensaba que todos los cráteres lunares se habían formado debido al incesante chaparrón de cuerpos cósmicos de todos los tamaños, desde pequeños meteoritos hasta pequeños planetas o asteroides que caían sobre la superficie lunar. Sin embargo, con la publicación de las primeras fotografías de la Luna tomadas de cerca (obtenidas en 1964 por el Ranger 7), la comunidad científica empezó a tomar conciencia de que las ideas de un grupo de geólogos disidentes eran correctas en lo esencial; según ellos, los procesos volcánicos tenían que haber jugado un papel muy importante en la conformación de los principales rasgos de la superficie lunar. Esta hipótesis se vería rápidamente reforzada por los millares de fotografías enviadas por los sucesivos vuelos Ranger, Surveyor, Lunar Orbiter y por las primeras misiones del proyecto Apolo (lámina 24). Los alunizajes de los Apolos 11, 12, 14, 15, 16 y 17, entre 1969 y 1972, permitieron muestrear ampliamente muchos tipos diferentes de rocas lunares, las cuales desde su llegada a la Tierra han sido objeto de intensas investigaciones, discusiones y controversias. A pesar de que muchos aspectos aún no son suficientemente conocidos, nuestros conocimientos acerca de la estructura interna de la Luna han mejorado enormemente, al igual que los conocimientos acerca de la composición de su corteza, de los procesos que formaron dicha corteza, y de la secuencia de acontecimientos que han determinado la evolución de las principales zonas de la superficie lunar. Además de la confirmación del origen volcánico de muchos elementos de la superficie de la Luna, otra constatación sorprendente que se derivó de la investigación de las rocas lunares en laboratorio ha sido la extrema antigüedad de casi todas las rocas muestreadas. Muy pocos de entre los diferentes tipos de rocas muestreadas han arrojado edades inferiores a los 3.000 millones de años, estando situadas la mayoría entre los 3.500 y los 4.000 millones de años de antigüedad —tan viejas como las rocas más antiguas halladas en la Tierra—, e incluso algunas de ellas presentan una edad que rebasa los 4.000 millones de años. Esto implica que el período principal de actividad geológica en la superficie de la Luna (tanto si se trata de actividad volcánica como de impactos meteoríticos) debió de terminar hace, cuanto menos, 3.000 millones de años; desde entonces la Luna ha permanecido como un planeta estéril, geológicamente tranquilo, perturbado únicamente por una incesante lluvia de pequeños meteoritos, con esporádicas colisiones de envergadura algo mayor y con pequeñas erupciones volcánicas y algunos terremotos. En cambio, durante el mismo período se ha producido en la Tierra el complejo desarrollo geológico de su corteza en la forma en que la conocemos hoy en día, resultante, tal como hemos visto, de una increíble historia de violencia y movilidad.

Incluso a simple vista pueden verse sobre la superficie de la Luna encarada a la Tierra algunos de los elementos más característicos. Las zonas oscuras, o *mares*, son grandes depresiones de fondo plano de las que en tiempos se pensó que se trataban de océanos o de restos de cuencas oceánicas, aunque hoy en día se sabe que son zonas ocupadas por gigantescas coladas de lava. Las áreas más claras circundantes, las tierras altas lunares, son zonas ocupadas por rocas brechoides de colores claros en que los cráteres están presentes en densidades muy elevadas; estas brechas están compuestas principalmente por *anortosita*, una roca ígnea rica en plagioclasas (silicatos de calcio y aluminio) cuya cristalización se produjo a cierta profundidad por debajo de la superficie lunar. En la cara oculta de la Luna, que nunca puede ser vista desde la Tierra, no hay mares como los que acabamos de describir; allí casi toda la superficie tiene el aspecto típico de queso de gruyere propio de las tierras altas de la cara visible. Hasta la datación de las rocas muestreadas en el decurso de las misiones del proyecto Apolo, se creía que todos los cráteres de la Luna eran el resultado del continuo bombardeo a que había estado sometida la superficie lunar desde el momento de su formación hasta la actualidad. Sin embargo, ahora sabemos que la inmensa mayoría de cráteres de las tierras altas lunares se formaron durante un período de intenso bombardeo acaecido en los primeros tiempos de la historia de la Luna, hace entre 4.600 y 4.000 millones de

años; sabemos, además, que este período de craterización intensa debió culminar en una serie de impactos extraordinarios que darían lugar a la formación de los mares lunares.

Se cree que la corteza exterior de la Luna se consolidó y se solidificó por completo adquiriendo un aspecto parecido al actual hace unos 4.400 millones de años. A finales de este proceso, la Luna fue bombardeada repetidamente por violentas tormentas de fragmentos, los restos de la nube primigenia a partir de la cual nacieron los planetas del sistema solar. Incluso después de la formación de una cierta corteza, el bombardeo continuó, saturando por completo las capas corticales exteriores y dando su aspecto característico a las tierras altas lunares; en ellas es frecuente que unos cráteres, con diámetros comprendidos entre 40 y 90 kilómetros, o incluso mayores, se superpongan a otros. Este bombardeo intenso afectó a los materiales corticales hasta una profundidad de 32 kilómetros aproximadamente. Poco después de 4.000 millones de años antes de la actualidad, las colisiones de unos pocos grandes cuerpos impactantes excavaron las cuencas llamadas mares lunares; es probable que en el mismo momento del impacto, y a raíz de los procesos de fusión generados por el choque, se formasen lavas en las cuencas marinas lunares, aunque los restos superficiales de este tipo de rocas son muy escasos debido a que las grandes depresiones marinas están en la actualidad completamente rellenas por potentes niveles de lavas basálticas más jóvenes procedentes de los volcanes fisurales que entraron en erupción hace entre 3.800 y 3.000 millones de años. Los impactos responsables de la formación de los mares determinaron la aparición de flujos piroclásticos parecidos a los terrestres, cuyos depósitos se desparramaron en espesas capas cubriendo grandes extensiones de terreno, llegando a menudo a centenares de kilómetros de los puntos de impacto. Desde el final del principal período de actividad volcánica, se han producido algunos grandes impactos meteoríticos ocasionales que han dado lugar a la formación de los jóvenes y prominentes cráteres "rayados", como Copérnico, que se formó hace unos 900 millones de años, y Tico, formado hace unos 100 millones de años. Un cráter muy reciente examinado por los astronautas del Apolo 17 tan sólo tenía 2 millones de años de antigüedad, lo cual certifica que la formación de cráteres ha continuado hasta nuestros días y que va a continuar en el futuro. El desbroce de antiguos documentos medievales ha permitido descubrir lo que probablemente es la única descripción de un impacto meteorítico sobre la Luna; la misma fue escrita por Gervasio de Canterbury en el año 1178. Decía así:

> ...una llameante antorcha se hizo visible, vomitando fuego, tizones encendidos y chispas hasta una distancia considerable. Mientras tanto, el cuerpo de la Luna se hallaba bajo una opresión, como si estuviese angustiada... y se agitó como una serpiente herida. Después recuperó su aspecto habitual. Este fenómeno se repitió una docena de veces, o incluso más, con las llamas entrelazándose en formas variadas y volviendo después a la normalidad. Al cabo de estas transformaciones, la Luna palideció de uno a otro cuerno, esto es, en toda su longitud, y tomó un aspecto negruzco.

En los últimos 3.000 años, las posibilidades de poder hacer una observación de este tipo desde la Tierra son, en el mejor de los casos, de 1 contra 2.000, incluso admitiendo una contemplación continua de la Luna. Por tanto, Gervasio de Canterbury tuvo realmente mucha suerte. Se cree que el resultado de este impacto es un cráter muy joven, descubierto recientemente y llamado *Giordano Bruno*.

Ya hace algunos cientos de años que la agujereada superficie de la Luna es conocida con cierto detalle, pero lo que realmente constituyó una sorpresa para los científicos fue el comprobar, mediante las fotografías enviadas por las sondas espaciales, que las superficies de Marte y sus satélites, así como las de Mercurio y de Venus, estaban también repletas de cráteres. Las fotografías enviadas por los vuelos Mariner y Viking demostraron que, al igual que en la Luna, en buena parte de la superficie marciana se había desarrollado una importante actividad volcánica; algunos grandes cráteres de su superficie son en realidad calderas de origen volcánico. La mayor de estas calderas, el Monte Olimpo, es probablemente el mayor volcán del sistema solar identificado hasta nuestros días; el diámetro en su base es de más de 1.600 kilómetros. Sin embargo, y al igual que sucede en la Luna, es evidente que en la superficie de Marte hay una gran cantidad de cráteres que nada tienen que ver con la actividad volcánica, sino que se deben a impactos meteoríticos. Las fotografías de Fobos, uno de los satélites de Marte, enviadas por el Viking Orbiter han mostrado que su superficie también está intensamente craterizada. Sus reducidas dimensiones (16 por 19 km) significan que nunca ha podido tener un interior lo suficientemente cálido como para dar lugar a actividad volcánica, por lo que en este caso todos los cráteres tienen que tener forzosamente un origen meteorítico. Las fotografías de Mercurio enviadas por los vuelos Mariner muestran que la superficie de este planeta tiene un aspecto muy craterizado parecido al de las tierras altas lunares. El diámetro de los cráteres mercurianos suele ser inferior a los 160 kilómetros, y también pueden identificarse algunos elementos volcánicos, por lo que, una vez más, es muy probable que algunos cráteres sean de origen volcánico. Las fotografías de radar de Venus, cuya masa es parecida a la de la Tierra y en cuya superficie también existen regiones "continentales" relativamente elevadas, han demostrado que también este planeta tiene una superficie craterizada; el cráter más grande tiene

un diámetro de unos 144 kilómetros, y su reborde está situado a unos 460 metros por encima del fondo. En el caso de Venus, el grado de vulcanismo superficial es totalmente desconocido, aunque parece razonable asumir que, como en los casos de la Luna, Marte y Mercurio, sus cráteres tienen también un origen mixto.

Hay varias características que delatan las similitudes existentes entre los grandes cráteres meteoríticos de la Luna y los astroblemas hallados en la superficie terrestre: el contorno circular o de aspecto antiguamente circular de los cráteres, a menudo con una parte central levantada debido a la reacción elástica de las rocas corticales que recibieron el impacto de un gran cuerpo meteorítico; los indicios de metamorfismo de choque, como la presencia de los cráteres de rocas resultantes de la fusión originada por los impactos; la acumulación de fragmentos o brechas expulsadas del interior del cráter, que en la Luna constituyen en muchos casos las "rayas" características de cráteres jóvenes, con alineaciones de pequeños cráteres subsidiarios formados por la caída de grandes masas de brechas; y muchos otros fenómenos. Antes de la constatación de la antigüedad de la mayoría de cráteres lunares, se creía que la mayor densidad de estructuras de impacto que presentaba la Luna respecto a la Tierra se debía fundamentalmente a la falta de atmósfera en la Luna, hecho que hubiera impedido que la mayor parte de meteoritos se quemasen antes de alcanzar su superficie, en un proceso parecido al que ocurre en la atmósfera terrestre. Actualmente se piensa que la tasa de bombardeo experimentada por la Luna ha ido cambiando notablemente con el transcurso del tiempo, y que la mayoría de cráteres lunares deben ser adscritos a una fase primitiva de intenso bombardeo meteorítico y asteroidal en un pasado lejano, cuando la Luna y la Tierra aún se estaban formando. Si bien la falta de atmósfera en la Luna implica que la misma haya sufrido una tasa elevada de bombardeo por pequeños meteoritos, mayor que la experimentada por la superficie terrestre, no basta para explicar por sí sola todas las diferencias existentes entre los modelos de impactos terrestre y lunar. Hoy en día prácticamente no tenemos ninguna evidencia de lo que ocurrió sobre la superficie de la Tierra durante los primeros períodos de su historia. Se encuentran rocas de esa época sólo en algunos lugares aislados de la corteza, pero los acontecimientos geológicos posteriores han modificado a menudo todo posible rastro de estructuras de impacto que han permanecido mucho tiempo obliteradas o disfrazadas. Mientras la Luna ha permanecido prácticamente congelada y estática durante los últimos 3.000 millones de años, en cambio la Tierra ha estado en comparación como un planeta violentamente activo en constante cambio geológico. En el registro geológico de los últimos 3.800 millones de años hay muy pocos restos claros resultantes de impactos meteoríticos. De las posibles estructuras de impacto que hasta el momento han sido identificadas sobre la superficie de la Tierra, tan sólo unas pocas pueden ser atribuidas con certeza absoluta a un impacto asteroidal o meteorítico; pero incluso dando por probado el origen de los astroblemas más dudosos, es evidente que el impacto de grandes meteoritos o asteroides que hayan formado cráteres es en la actualidad un hecho excepcional sobre la Tierra. Un cuidadoso contaje de los cráteres de la Luna ha demostrado que la tasa de craterización existente antes de la barrera de los 4.000 millones de años de antigüedad era centenares o miles de veces mayor que la tasa de craterización reciente. Además, es evidente que dicha tasa declinó rápidamente desde los primeros tiempos hasta hace unos 2.000 años, momento en que ya quedó establecida una tasa parecida a la existente hoy en día. Desde entonces dicha tasa se ha mantenido relativamente constante. Se piensa que los restantes planetas interiores y sus satélites, incluyendo la Tierra, siguieron una secuencia de impactos parecida. La gama de tamaños de los meteoritos y asteroides que formaron los cráteres de la Luna y de los planetas interiores es esencialmente la misma que presentan hoy en día los fragmentos espaciales de los cinturones de asteroides. Los meteoritos que caen sobre la Tierra quedan englobados dentro de esta gama; son un tipo característico de fragmentos debido al choque de grandes masas de rocas a altas velocidades.

En resumen, y a la luz de los conocimientos actuales, la familia de planetas solares parece haberse formado hace unos 4.600 millones de años debido a la agregación y contracción gradual de la nube de polvo y gases que rodeaba al Sol primitivo en torno a unos pocos centros de atracción gravitacional que con el paso del tiempo se transformarían en grandes objetos sólidos, los planetas. Pero antes de eso, los protoplanetas recién formados debieron estar sometidos a un intenso bombardeo a cargo de los objetos restantes, tanto si eran grandes como pequeños. El barrido inicial de los restos dejados por la nebulosa primitiva pudo producirse en unos pocos millones de años y, al parecer, durante este primitivo período se generó una cantidad de calor suficiente para fundir las rocas (magmas) y desencadenar una importante actividad ígnea en la superficie y en la subsuperficie de los protoplanetas; como resultado de este proceso se formarían gruesas capas corticales cristalinas. Así, las edades de las rocas halladas en las superficies de los cuerpos planetarios interiores son de 4.600-4.400 millones de años aproximadamente. Sin embargo, estas rocas sólo se encuentran de forma fragmentaria, ya que aquél fue también un período de intenso bombardeo durante el cual las primitivas cortezas fueron rápidamente pulverizadas bajo cráteres de impactos superpuestos. Hace unos 4.000 millones de años, uno de los protoplanetas más pequeños se fragmentó, posiblemente

debido a fuerzas mareales. A continuación, le siguieron numerosas colisiones entre los fragmentos resultantes. Los restos derivados de la fragmentación de este protoplaneta constituyen el actual cinturón de asteroides, principal reservorio de meteoritos y pequeños cuerpos interplanetarios y del que proceden la inmensa mayoría de proyectiles que desde aquellos tiempos han ido cayendo sobre los planetas interiores. Las edades de los meteoritos revelan que su planeta parental se formó entre 4.600 y 4.400 millones de años atrás. Los mayores cuerpos formados por este proceso de fragmentación apenas superan unos pocos centenares de kilómetros de diámetro. Algunos chocaron contra la Luna, originando los mares lunares, y otros contra la Tierra. Si se admite que todos los cráteres meteoríticos perfectamente identificables existentes hoy en día en el conjunto de los planetas interiores han sido formados por proyectiles procedentes del cinturón de asteroides, se llega a la conclusión de que el número original de cuerpos existentes en el cinturón era aproximadamente el doble de los que aún hay en la actualidad. El vulcanismo tuvo una gran importancia en los principales planetas terrestres y en la Luna hace unos 3.000-4.000 millones de años. Sin embargo, únicamente en la Tierra se producía una cantidad de calor radiactivo interno suficiente para provocar una intensa movilidad cortical, para hacer del vulcanismo un elemento permanente que conduciría a la formación y desarrollo de una hidrosfera y una atmósfera relativamente densa, y para generar la fuerza motriz necesaria para impulsar los repetidos alzamientos, orogenias, y los procesos erosivos, sedimentarios, magmáticos y metamórficos que se han ido sucediendo ininterrumpidamente a lo largo de la historia de la Tierra.

¿Cuál es, pues, para el hombre el riesgo de bombardeo extraterrestre? A pesar de que las evidencias existentes en la Tierra no estén tan bien específicamente conservadas como las de la Luna, Marte y Mercurio, numerosas observaciones y estudios permiten afirmar categóricamente que la Tierra está siendo y seguirá estando sometida continuamente al mismo tipo de bombardeo espacial que han experimentado la Luna y los restantes planetas interiores. Esta afirmación se basa en la moderna observación científica de las caídas de meteoritos, en la identificación y catalogación de un número bastante considerable de cráteres de impacto meteorítico de edad relativamente reciente, y en el estudio de los astroblemas antiguos existentes sobre la superficie de nuestro planeta. En consecuencia, las posibilidades de una colisión entre la Tierra y un planetesimal o asteroide tan grande como los que dieron lugar a la formación de los cráteres lunares de Copérnico, Aristarco y Tico (hace 900, 600 y 100 millones de años, respectivamente) en un futuro geológicamente próximo no deben ser minusvaloradas. Por otra parte, la Tierra también debe haber pasado por un período

de craterización intensa cuya edad coincidiría con la del período de craterización lunar y del resto de planetas interiores. Únicamente sabemos de la existencia de un número muy reducido de esos cráteres (aquellos formados en áreas emergidas y que han sido identificados como tales). El Deep Bay Crater, en el extremo sur del lago Reindeer, en Saskatchewan, por ejemplo, mide 8 kilómetros de diámetro y es, sin ningún género de dudas, un astroblema que representa un impacto cuya edad es aproximadamente la misma que la de Tico, en la Luna. En el peor de los casos, si hoy en día se produjese en la Tierra un impacto de la magnitud de los que originaron Tico, Aristarco o Copérnico en la Luna, es muy posible que toda la raza humana desapareciese. En el mejor de los casos, la catástrofe adquiriría a una escala inimaginable unas proporciones nunca vistas.

Las grandes llanuras formadas por la consolidación de las lavas basálticas de los mares lunares nos permiten analizar los efectos de un gran impacto meteorítico sobre una superficie plana. Los impactos debidos a la caída de meteoritos de uno o dos kilómetros de diámetro sobre las lavas de los mares lunares han provocado explosiones enormes, responsables de la excavación de grandes cráteres y de la expulsión y amontonamiento de capas de lavas lunares hasta formar rebordes de más de un kilómetro y medio de alto alrededor de los cráteres. Simultáneamente auténticos chorros de materiales salieron despedidos y al caer formaron largos rosarios de polvo y vidrio distribuidos radialmente alrededor del cráter y claramente visibles desde la Tierra. Los fragmentos que salieron despedidos a baja velocidad cayeron rápidamente formando en torno al cráter una gruesa capa irregular cuyo diámetro es varias veces superior al del propio cráter. La lluvia de material fue especialmente intensa en el reborde del cráter, contribuyendo de este modo a incrementar su altura. Muchos bloques aislados, arrancados por la explosión, formaron pequeños cráteres subsidiarios al caer en las inmediaciones del cráter principal. A pesar de que en la Luna no existe una atmósfera equivalente a la de la Tierra, en ella también se han formado, en las inmediaciones de algunas de las mayores cicatrices de impacto, flujos piroclásticos debidos a la fluidificación de los fragmentos sólidos, originada por los gases liberados durante la fusión instantánea de las rocas en las zonas de impacto. Muy probablemente, en la Tierra, los alrededores de cráteres de impacto de tamaño parecido también debieron ser recubiertos por flujos piroclásticos incluso mayores. Obviamente, la onda de choque atmosférica originada por uno de tales impactos tendría un efecto catastrófico a añadir. Además, y aparte de su propio poder destructivo, las ondas sísmicas primarias originadas por el impacto podrían desencadenar violentos terremotos subsidiarios en áreas distantes en las que el nivel de esfuerzos en la corteza terrestre fuese ya de por sí bastante elevado. Una

última consecuencia del impacto podría ser la formación de grandes olas, tsunamis, en las grandes masas de agua que rellenan las principales depresiones de la corteza de la Tierra.

La caída de un gran objeto espacial sobre la Tierra tendría consecuencias catastróficas, incluso suponiendo que en lugar de caer sobre un área densamente poblada en el interior de un continente o en las populosas costas de un océano, cayese en el centro del océano Pacífico. La onda de choque resultante destruiría la vida marina en un amplio radio, mientras que el tsunami gigante resultante podría alcanzar entre 700 y 1.600 metros de altura; obviamente, al llegar a la costa, el mismo ocasionaría unos daños irreparables. Los gases, el vapor de agua y el polvo generados por el impacto ascenderían hasta las capas superiores de la atmósfera, desde donde podrían ejercer una considerable influencia sobre el clima mundial durante un largo período de tiempo. Tampoco es inconcebible que el impacto y la penetración de un cuerpo extraterrestre lo bastante grande desencadenase una edad de hielo o modificase seriamente el campo magnético terrestre. Sea como sea, los efectos combinados de un evento de estas características serían desastrosos. No es imposible que la desaparición de algunas especies en el pasado —por ejemplo, los dinosaurios— se debiese a una catástrofe cósmica similar.

La superposición de un mapa del cráter de Copérnico (90 kilómetros de diámetro) sobre un mapa de cualquiera de los continentes de la Tierra sirve para que nos hagamos una idea aproximada de las proporciones de la zona de devastación total que causaría un impacto como el que acabamos de describir. La energía liberada estaría situada entre 10^{10} y 10^{35} ergios; esto equivale a una explosión puntual de un ingenio nuclear de muchos centenares de millones de megatones. Las ondas de choque generadas por el impacto tendrían una fuerza y unas proporciones descomunales, con un máximo mensurable en megabares (millones de veces mayores que la presión atmosférica), presión que tan sólo tiene parangón con la existente en el núcleo de la Tierra. Una onda de presión de tal intensidad provocaría a su paso la fusión, la deformación y la soldadura de las partículas de roca de la corteza e induciría cambios de fases en los minerales que las constituyen. Lógicamente, a medida que las ondas de choque se fueran desplazando irían perdiendo energía hasta llegar a un punto en el que ya no serían capaces de producir la deformación plástica de las rocas, a pesar de que aún les restaría energía suficiente para fracturarlas hasta hacerlas añicos. Desde el cráter, cuyos alrededores estarían intensamente agrietados, las ondas de choque sísmicas se propagarían cruzando todo el globo, desencadenando a su paso terremotos de intensidad tanto menor cuanto más lejos estuviesen del punto de impacto. Evidentemente, la pérdida inmedia-

ta de vidas humanas y los daños materiales causados revestirían proporciones casi continentales. El número de muertos, incluso en regiones situadas prácticamente en las antípodas del punto de impacto, causados por los tsunamis, los terremotos y las erupciones volcánicas inducidas sería asimismo enorme; ciudades y construcciones de todo tipo serían destruidas o seriamente dañadas. Las pérdidas indirectas de vidas humanas (debido al hambre, las enfermedades, las radiaciones, los cambios climáticos y de nivel de radiación a corto y largo plazo) podrían alcanzar cifras mucho mayores que las de las pérdidas directas; incluso, dadas determinadas circunstancias, podrían acarrear la extinción de la especie humana. Aun partiendo de un punto de vista menos dado al catastrofismo, es evidente que los efectos de un impacto de estas características serían cataclísmicos y tendrían consecuencias imprevisibles para el hombre, para su estilo de vida y para sus frágiles sistemas políticos. La vida sobre la Tierra cambiaría extraordinariamente hasta quedar irreconocible. Los efectos de un impacto algo menor serían igualmente desastrosos, aunque en menores proporciones. Así, por ejemplo, el impacto de un pequeño cometa o asteroide sobre un área densamente poblada sería tan devastador como podría resultar un supuesto holocausto termonuclear causado por el hombre.

Vamos a suponer que un cuerpo espacial, con un tamaño equivalente al de alguno de los grandes cuerpos que han golpeado la Tierra o la Luna durante los últimos 600 millones de años, cae en los Estados Unidos, cerca de Columbus, Ohio. ¿Cuáles serían las consecuencias más probables de esta catástrofe? Obviamente, en el área de impacto no quedaría ni rastro de vida; lo mismo ocurriría en un radio de varios centenares de kilómetros debido al paso de la onda de presión producida por la explosiva colisión. Los efectos de la onda de presión atmosférica, combinados con las ondas de choque sísmicas, la densa lluvia de objetos volantes procedentes del cráter y el derramamiento de los flujos piroclásticos incandescentes formados, eliminarían a la mayoría de habitantes del este de los Estados Unidos. Los terremotos secundarios, las "seiches" y los tsunamis matarían a otros muchos; en total, quizás más del 30 % de la población de Norteamérica moriría inmediatamente. Pero esto no sería todo, ya que otros muchos morirían a raíz de la desaparición de las comodidades y servicios habituales y de los intensos cambios climáticos y geográficos ocasionados. El hambre y las enfermedades se propagarían y, por último, muy pocos sobrevivirían. Sería el fin de la civilización norteamericana tal y como la conocemos hoy en día.

En el lugar actualmente ocupado por Columbus y sus alrededores no habría más que un gran cráter de impacto, de unos 80 kilómetros de diámetro, con unas paredes de varios kilómetros de alto recubiertas de fragmen-

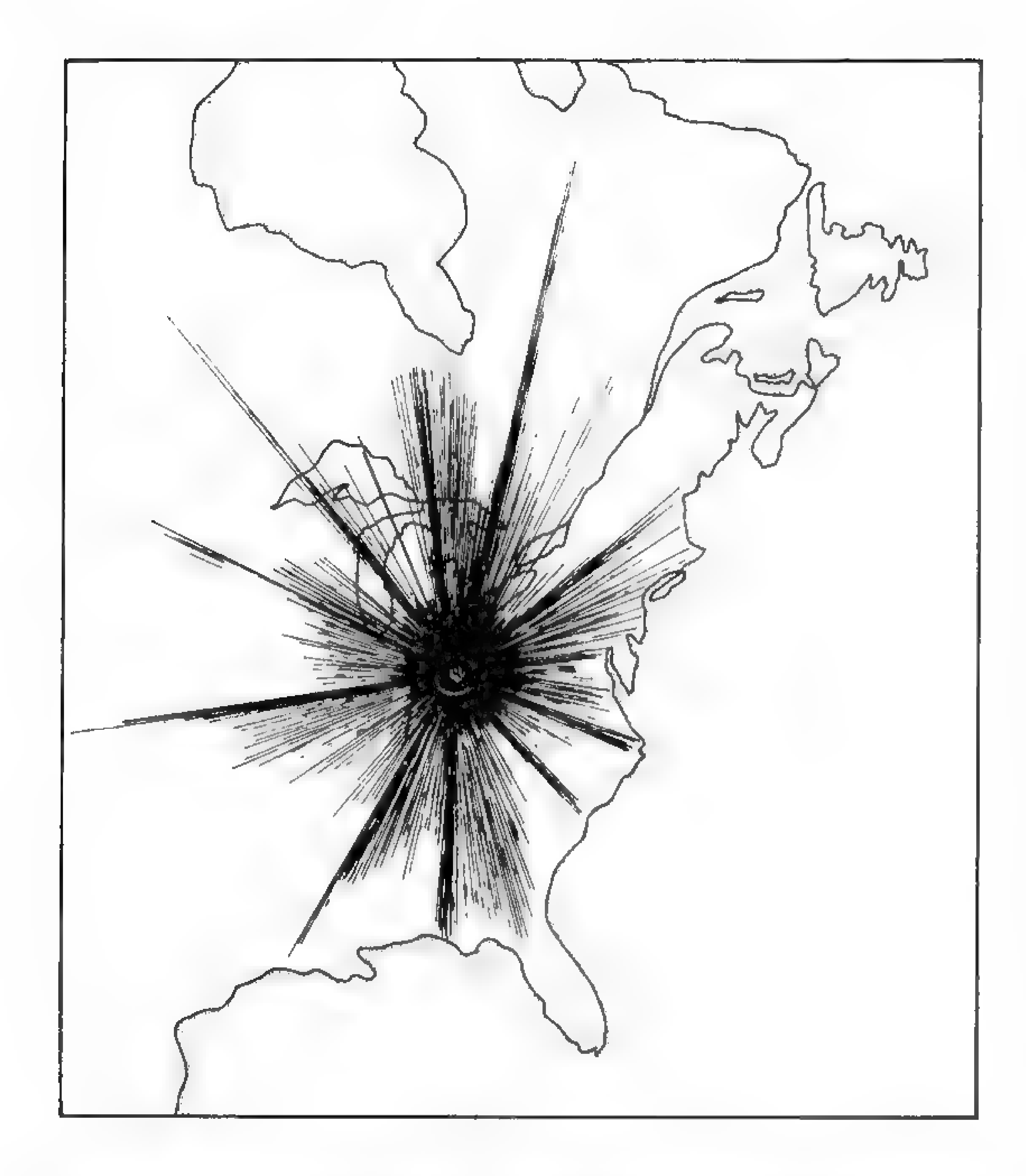


Fig. 34. Los efectos de la caída de un pequeño cuerpo astronómico (de tamaño no superior al de algunos que han colisionado con la Tierra o la Luna a lo largo de los últimos 600 millones de años) en Columbus, Ohio, serían más devastadores que cualquiera de los desastres imaginados para esa ciudad por James Thurber. Columbus se convertiría en un gran cráter, de unos 80 kilómetros de diámetro; del mismo irradiarían gran cantidad de fragmentos incandescentes que afectarían a casi la mitad del continente. El evento acarrearía la muerte del 30 % de la población de Norteamérica. Al este de las Rocosas, desaparecería todo rastro de vida civilizada.

tos de roca volcados. En centenares de kilómetros a la redonda del cráter, la superficie del suelo original estaría cubierta por un grueso abanico de fragmentos aerotransportados; en el abanico serían visibles otras marcas de impactos dejadas por la caída de bloques y cantos, así como numerosas fallas, horsts y grabens generados por los movimientos de hundimiento y alzamiento asociados con la reacción elástica de la superficie de la Tierra después del paso de las ondas de choque. Ciudades tan alejadas como Chicago, San Luis, Memphis, Knoxville y Cleveland serían completamente destruidas por la acción combinada de las ondas de choque atmosféricas y sísmicas, y además quedarían total o parcialmente enterradas bajo el abanico de fragmentos aerotransportados. Una especie de grandes chorros de derrubios saldrían despedidos del cráter en diferentes direcciones y enormes corrientes fluidificadas de fragmentos incandescentes se esparcerían por los alrededores del cráter, desplazándose sobre el suelo a velocidades de más de 160 kilómetros por hora. Algunos de estos "rayos" o rosarios de fragmentos incandescentes alcanzarían incluso las costas del continente, quemando, matando y sepultando todo lo que fuesen hallando a su paso. Poco tiempo después del impacto, los rayos de fragmentos enfriados y consolidados constituirían una especie de grandes barreras que dividirían en varios sectores toda la mitad oriental del continente americano. En el interior de los sectores, incluso en las zonas más alejadas del cráter y del abanico sepultado de fragmentos, los daños serían elevados. Todos los lugares próximos a un lago, un río o el mar habrían sufrido daños de consideración debido a las perturbaciones sísmicas del agua, que darían pie a la formación de grandes olas y tsunamis; en las zonas costeras, la brusca retirada del mar habría ido seguida por el catastrófico retorno de un gigantesco muro de agua que se abatiría barriéndolo todo sobre la playa. Estos fenómenos traerían por sí solos la desolación y la muerte a Toronto, Nueva York, San Francisco y otras muchas ciudades. Por todas partes los terremotos habrían agrietado el suelo, derruido montañas, desviado ríos, derrumbado presas, colapsado pozos petrolíferos y traído cualquier otro tipo de desastre imaginable. Entre tanto, el tiempo probablemente se habría desquiciado, con gigantescos huracanes y tormentas que contribuirían a incrementar el horror que se estaría viviendo bajo un cielo oscurecido por las nubes de polvo. Evidentemente, la pérdida de vidas humanas que se produciría en Norteamérica después de un impacto de estas características sería mayor que la que podría haber en cualquier otro lugar del mundo en que ocurriese un impacto similar; de todos modos, las consecuencias del mismo serían igualmente catastróficas en todo el mundo, ya que los tsunamis gigantes originados en las proximidades del continente americano darían la vuelta al mundo, incidiendo especialmente en las costas del Atlántico y del Pacífico. Aun

después de haber cruzado miles de kilómetros de aguas oceánicas, posiblemente estas olas gigantes todavía medirían muchas decenas de metros de altura, manteniendo prácticamente intacto todo su poder destructivo, que se traduciría en la muerte adicional de muchos millones de personas más. Otros efectos secundarios de alcance mundial contribuirían a aumentar el número total de víctimas: terremotos, desastres climáticos, enfermedades, epidemias. Las implicaciones políticas del hecho, especialmente si el egoísmo humano superase a su capacidad de compasión, podrían ocasionar aún más muertes. Obviamente, las cosas nunca volverían a ser como antes.

Del conjunto de datos y observaciones que hemos ido examinando a lo largo de este capítulo se deduce que los bombardeos terrestres representan un peligro permanente, aunque improbable, para la humanidad. Ocasionalmente, algún individuo puede resultar herido o alguna pertenencia dañada por una de las caídas de pequeños meteoritos que impactan sobre nuestro planeta a una tasa de unos tres o cuatro cada día. Por fortuna, la caída de grandes meteoritos es mucho menos frecuente, por lo que el riesgo real de morir a causa de un impacto meteorítico es en realidad muy bajo. De esto se deduce que la probabilidad matemática de una colisión entre la Tierra y un gran cuerpo extraterrestre, como por ejemplo un asteroide o un planetesimal de varios kilómetros de diámetro, es muy remota. Sin embargo, la posibilidad existe y si para algo ha de servir lo que hemos expuesto en las páginas precedentes es para demostrar que en el pasado geológico se han producido con relativa frecuencia colisiones de este tipo y que éstas van a seguir produciéndose de nuevo en el futuro geológico. Si el próximo gran impacto de un asteroide o de un cometa se produce en un futuro muy lejano, quizás más allá de las perspectivas de supervivencia de la raza humana, tanto mejor. Pero el hecho sigue siendo que, aunque improbable, un impacto de tales características puede producirse en cualquier momento. ¿No sería, por tanto, prudente la creación de un organismo internacional dedicado a analizar y estudiar continuamente el problema, a coordinar el esfuerzo investigador espacial que se está realizando en el mundo (actualmente fragmentado y a menudo llevado a cabo con el más absoluto de los secretos), con el fin de estar seguros de seguir las trayectorias de todos los objetos que se aproximen a la órbita terrestre y, por último y más importante, destinado a convertirse en el órgano rector del mundo en el caso de que se identifique en el espacio un objeto peligroso y que sea inminentemente necesario evitar o mitigar los efectos del desastre si éste llega a producirse? Aunque la única tarea encomendada a este organismo internacional fuese el advertir a las potencias del mundo el verdadero origen de un impacto natural inesperado con el fin de evitar una guerra nuclear por error, ya tendría de por sí una utilidad extraordinaria.

VIII. ¿SUPERVIVENCIA O CATÁSTROFE?

Conozco bien aquellos que se lo creerán,
todos los astutos amigos que seguirán.
Vinieron, una docena de hombres juntos,
nunca conocieron mis temores solitarios.
Siguieron el campamento que había abandonado,
utilizaron los hoyos de agua que había cavado.
Ellos volverán y harán el relato. A *ellos*
les llamarán los Pioneros.

R. Kipling, *El Explorador*

El hombre ha sobrevivido frente a muchas grandes catástrofes naturales. Tenemos información directa, a menudo muy detallada, acerca de las catástrofes del pasado más reciente y también son abundantes, aunque menos precisos, los datos que hacen referencia a los últimos dos o tres mil años. A veces, después de las grandes catástrofes, los supervivientes parecen haber perdido el deseo de vivir, pero esta actitud es circunstancial y está bastante demostrado que la especie humana tiene una gran resistencia y una capacidad increíble para sobreponerse a los grandes desastres. Sin embargo, es sorprendente que el hombre, dado su ingenio, demostrado muchas veces en su lucha para la supervivencia, haya dedicado tan poca atención a la predicción de los diferentes tipos de desastres naturales y a su control; hay, empero, algunas honrosas excepciones de carácter local. Generalmente, el hombre sólo se preocupa por estos asuntos *después de la catástrofe*, cuando ya es demasiado tarde. Muchas culturas, en efecto, han adoptado y aún siguen adoptando una actitud fatalista ante los desastres naturales, y esa actitud les ha llevado a ignorar por completo los signos premonitorios que preceden a la catástrofe; cuando la misma se produce,

se la acepta como una muestra de la "cólera de los dioses", ante la cual todo escapa al control humano. Aún hoy en día, con nuestros considerables conocimientos del mundo natural, nuestros esfuerzos por mitigar los previsibles efectos calamitosos de algunos procesos naturales relativamente sencillos y bien conocidos no dejan de ser débiles y descoordinados. Cada año mueren miles de personas debido, en gran medida, a nuestra incapacidad de reacción ante las enseñanzas del pasado. Los estudios geológicos demuestran que, a lo largo de su historia, en nuestro planeta se han ido sucediendo una serie interminable de eventos naturales catastróficos; muchos de ellos han sido en varios órdenes de magnitud mayores que los ocurridos en los tiempos recientes o históricos. Podemos dar por seguro que en el futuro se producirán inevitablemente nuevos eventos naturales, grandes y pequeños, potencialmente catastróficos. Este hecho es consustancial a la propia Tierra. Se puede prever que millones de víctimas inocentes morirán a causa de fenómenos naturales. Sin embargo, los autores de este libro tienen la firme convicción de que si bien tales eventos naturales son inevitables, la mayoría de muertes sí pueden ser evitadas. Si el hombre racionalizara el uso de sus conocimientos, de sus recursos y de su ingenio con el fin de predecir, controlar y mitigar los desastres naturales, con una dirección nacional e internacional adecuada, el ahorro de vidas humanas sería verdaderamente notable. Creemos que éste es el gran reto del futuro, conservar la vida humana conservando también el medio ambiente.

En la actual situación de falta de preparación y descoordinación ante cualquier desastre natural, las autoridades civiles tropiezan a menudo con grandes dificultades cuando tratan de buscar una opinión científica inequívoca y experimentada que les ayude a salir del atolladero y a aclararse entre la avalancha de opiniones contradictorias que surgen inevitablemente cuando una catástrofe natural parece inminente. Esta desgraciada y potencialmente peligrosa situación queda perfectamente ilustrada por algunos casos reales en que, ante la inminencia de una erupción volcánica, se han producido más muertos durante la caótica y desesperada evacuación de la población que como consecuencia directa de la temida erupción. Esta falta de preparación y de planificación es realmente lamentable. Ante la inexistencia de una "Autoridad Mundial para Prevenir y Evitar el Riesgo de Catástrofes Naturales", ¿cómo puede un administrador local ser capaz de discernir entre la opinión de un científico que se autodenomina "vulcanólogo" y la de otro, quizás un rostro conocido gracias a la televisión, que se presenta como un "petrólogo" o un "geofísico"? Las opiniones de estos autotitulados expertos probablemente no serán desinteresadas: algunos científicos ambicionan tanto la fama, o a veces incluso más, que los restantes profesionales.

El pasado está lleno de ejemplos en que científicos totalmente incapacitados para predecir desastres, al expresar sus opiniones, pecaron de inexperiencia e ignorancia, o incluso llegaron a ocultar deliberadamente los datos de que disponían. En 1972, la Soufrière de St. Vincent, en las Indias Orientales, entró en erupción y formó un domo de lava que vertía hacia el interior del lago que ocupaba el cráter. Haciendo caso omiso de las recomendaciones de un vulcanólogo que se hallaba estudiando la isla, según el cual no había nada que temer, toda la población de la región septentrional de la isla fue evacuada con grandes dispendios debido fundamentalmente a la opinión formulada por un "experto" que se encontraba a miles de kilómetros de distancia, y cuyas observaciones y deducciones estaban basadas únicamente en imágenes de televisión y en fotografías de satélite. En otra ocasión, en 1973, una erupción en la isla de Heimaey provocó el enterramiento casi completo del puerto pesquero de Vestmannaeyjar. Al principio, las autoridades islandesas estaban decididas a utilizar explosivos para desviar hacia el Atlántico la corriente de lava que estaba amenazando su ciudad. Un "experto" extranjero con muy poca experiencia vulcanológica convenció a las autoridades para que no lo hiciesen, ya que esto podría poner en contacto cantidades enormes de rocas fundidas con cantidades igualmente enormes de agua, lo cual desencadenaría una serie de explosiones en cadena que culminarían en magnitudes atómicas. Naturalmente, el proyecto inicial fue arrinconado, a pesar de que el "experto" estaba totalmente equivocado. Paradójicamente, esta ridícula situación no terminó aquí. Poco después, otro "experto" extranjero que no tenía ni la menor idea de vulcanología, convenció a las autoridades de que podrían detener la lava, que en aquellos momentos amenazaba con bloquear la entrada del puerto y destruir la ciudad, regándola con enormes cantidades de agua desde mar y tierra. De nuevo se hizo caso de una opinión desacertada. Haroun Tazieff recuerda: "Nada pudo disuadirles, ni tan siquiera la evidencia de que ni el propio océano Atlántico, con toda su agua, había podido detener las principales corrientes de lava que llevaban dos meses penetrando en el mismo." Los vulcanólogos experimentados están habituados a las tranquilas entradas de grandes ríos de lava incandescente hacia el interior de los océanos y saben muy bien que ni siquiera el peso de infinitos millones de toneladas de agua, a muchos miles de metros de profundidad, puede impedir la extrusión de flujos de lava en los fondos oceánicos; los ingentes volúmenes de lava que salen por los fondos oceánicos han sido capaces de formar las dorsales medio-oceánicas y muchas islas volcánicas, como Surtsey, la isla Decepción y Tristan da Cunha. Las opiniones de gente inexperta, que pueden movilizar a todo un pequeño país y ocasionarle unos gastos astronómicos e inútiles, son a la vez crueles y criminales.

Otro hecho de esta índole ocurrió durante la erupción del año 1976 en la Soufrière de Guadalupe, en las Indias Occidentales, cuando un grupo de expertos vulcanólogos que estaban investigando la erupción informaron de que la misma no entrañaba ningún peligro real. En su opinión, era muy improbable que, dadas las características de la erupción, se produjesen avalanchas de nubes ardientes procedentes del volcán. Esta opinión se basaba en muchos años de experiencia y en la observación de que no llegaba magma fresco al cráter; en realidad, las cenizas esparcidas por la erupción no eran más que viejos residuos volcánicos retrabajados. A pesar del informe elaborado por estos experimentados vulcanólogos, apoyado en cuidadosos estudios sobre el volcán, las autoridades tomaron lamentablemente en consideración los puntos de vista de otros "expertos"; aprovechando que el jefe del equipo de vulcanólogos se había desplazado a otro volcán, esos "expertos" forzaron la evacuación de 73.600 personas. El coste de tal disparate fue, obviamente, enorme. Más tarde, uno de esos otros científicos se vio obligado a admitir que había introducido falsas evidencias en su informe, las cuales sugerían erróneamente que estaba saliendo magma fresco por el cráter. La deshonesta actuación de estos otros "expertos", basada en conclusiones sin fundamento, dio pie a una evacuación innecesaria (con el pánico subsiguiente que tales medidas suelen comportar) y motivó que algunos científicos honestos y muy capacitados fuesen echados, aunque sólo de forma temporal, de sus puestos de trabajo.

Estos hechos ilustran la importancia que tiene la elección con tiempo previo oportuno de expertos cualificados cuando se trata de hacer frente a catástrofes naturales de cualquier tipo. El científico mejor recomendado y más autoritario no es necesariamente el más cualificado para este cargo. Se necesitan científicos formando un equipo de trabajo con experiencia directa en este tipo de situaciones, que sea responsable, capacitado para evaluar objetivamente los hechos, de relacionar e interpretar correctamente *todos* los datos significativos y de valorar adecuadamente las opiniones de otros expertos antes de llegar a unas conclusiones definitivas. Su interés primordial debe ser el de salvaguardar las vidas humanas, de las que es indirectamente responsable; ante cualquier catástrofe natural inminente, los intereses científicos "puros" deben pasar a un segundo plano.

En los últimos años se han realizado inmensos avances en el estudio del riesgo sísmico y de los restantes riesgos naturales. Muchos países ya están cubiertos por una amplia cuadrícula de mapas de riesgo sísmico, que ilustran las diversas posibilidades que cada región tiene de experimentar terremotos más o menos dañinos; las técnicas instrumentales permiten medir y controlar cualquier concentración de esfuerzos peligrosa en las rocas de la corteza terrestre, especialmente en las zonas propensas a los terremotos; está ampliamente admitida la necesidad de respetar unas normas especiales, llamadas de sismorresistencia, en la construcción y diseño de edificaciones en las áreas sísmicas; se sabe qué tipos de materiales de construcción no deben ser empleados en tales áreas. Aun hoy en día, y en muchos lugares del mundo con elevado riesgo sísmico, hay gente que vive prácticamente sin ningún tipo de protección; se sigue construyendo en zonas consideradas como peligrosas, porque son más baratas. Uno se sorprende cada vez más cuando ve que se siguen construyendo hospitales, puestos de socorro, de bomberos y de policía en zonas de elevado riesgo sísmico y que esas construcciones se hacen sin tomar las más elementales medidas de precaución.

En 1949, más de 10.000 personas murieron sepultadas bajo los deslizamientos desencadenados por un terremoto en la región del Tadzhikistán. El gobierno de la Unión Soviética envió a un equipo de científicos para que estudiasen la zona; se les pidió especialmente que investigasen todos los posibles indicios que pudiesen ser utilizados para predecir futuros terremotos. Después de 20 años de concienzudas investigaciones, el equipo soviético presentó sus hallazgos en una conferencia internacional. Habían descubierto que los terremotos iban precedidos por cambios mensurables en la conductividad eléctrica de las rocas constituyentes de la corteza; en las aguas de algunos pozos profundos se hallaron concentraciones anómalamente altas del gas radiactivo radón; la parte de la superficie terrestre situada encima de un foco sísmico potencial era distorsionada tanto horizontal como verticalmente; y, además, se producía una variación perfectamente discernible en la velocidad de las ondas sísmicas que atravesaban las rocas sometidas a esfuerzos (esta variación podía ser detectada sin dificultades mediante sismógrafos convencionales). Los japoneses, los americanos y otros científicos habían llegado a conclusiones parecidas, y uniendo los conocimientos adquiridos, por primera vez en la historia surgió la emocionante posibilidad de prever los terremotos. Esto ocurría a comienzos de la década de los 70.

Actualmente, los terremotos pueden ser previstos *si se dispone de la información necesaria.* Existen varios sistemas para medir en continuo el "pulso de la Tierra" en las áreas de alta sismicidad, como por ejemplo en las inmediaciones de la Falla de San Andrés, en California. Los controladores pueden medir la distorsión progresiva del suelo mediante niveles y teodolitos convencionales, y también instrumentos más sofisticados como inclinómetros, reptómetros y aparatos láser. Los pequeños cambios en las características de las rocas situadas a gran profundidad pueden ser detectados mediante magnetómetros, gravímetros, sismógrafos y sondas de resistivi-

dad. Los escintilómetros indican los cambios en la concentración de radón disuelto en las aguas subterráneas. La mayoría de cambios físicos observados a través de estos métodos se deben a la dilatancia (las rocas sometidas a grandes esfuerzos se expanden, apareciendo en ellas una infinidad de grietas que favorecen la penetración del agua). Los científicos chinos han sido los pioneros en algunos métodos alternativos de predicción de los terremotos, basados en sus estudios sobre el comportamiento de diferentes animales inmediatamente antes de los grandes terremotos. A partir de 1970, y a raíz de todos estos trabajos, se han predicho con éxito uno o dos terremotos importantes en América, la URSS, Japón y China; no obstante, al otro lado de la balanza deben colocarse todos los terremotos inesperados que han causado cuantiosos daños en diferentes lugares del mundo a lo largo de este período. Obviamente, es necesario aumentar nuestros conocimientos, y para ello es imprescindible destinar más dinero y efectuar un mayor esfuerzo investigador en las zonas sísmicas con el fin de que pueda cristalizar en algo positivo para toda la humanidad lo que hasta ahora no han sido sino unas pocas predicciones acertadas. Si se anima y se financia adecuadamente a los científicos interesados en este tipo de investigaciones, no hay ninguna razón que nos impida suponer que la predicción de los terremotos no va a convertirse en un trabajo de rutina de aquí a diez años vista. Es necesario crear un servicio mundial de predicción de los terremotos, con el asesoramiento necesario para salvar vidas humanas del que se beneficiarían tanto los países avanzados como los subdesarrollados. Este servicio es necesario porque actualmente su elevado coste y su complejidad tecnológica rebasan las posibilidades de muchos de los países en los que el riesgo sísmico es mayor. Se están haciendo lentos progresos en este sentido, pero las actuales medidas internacionales al respecto aún distan mucho de ser las adecuadas.

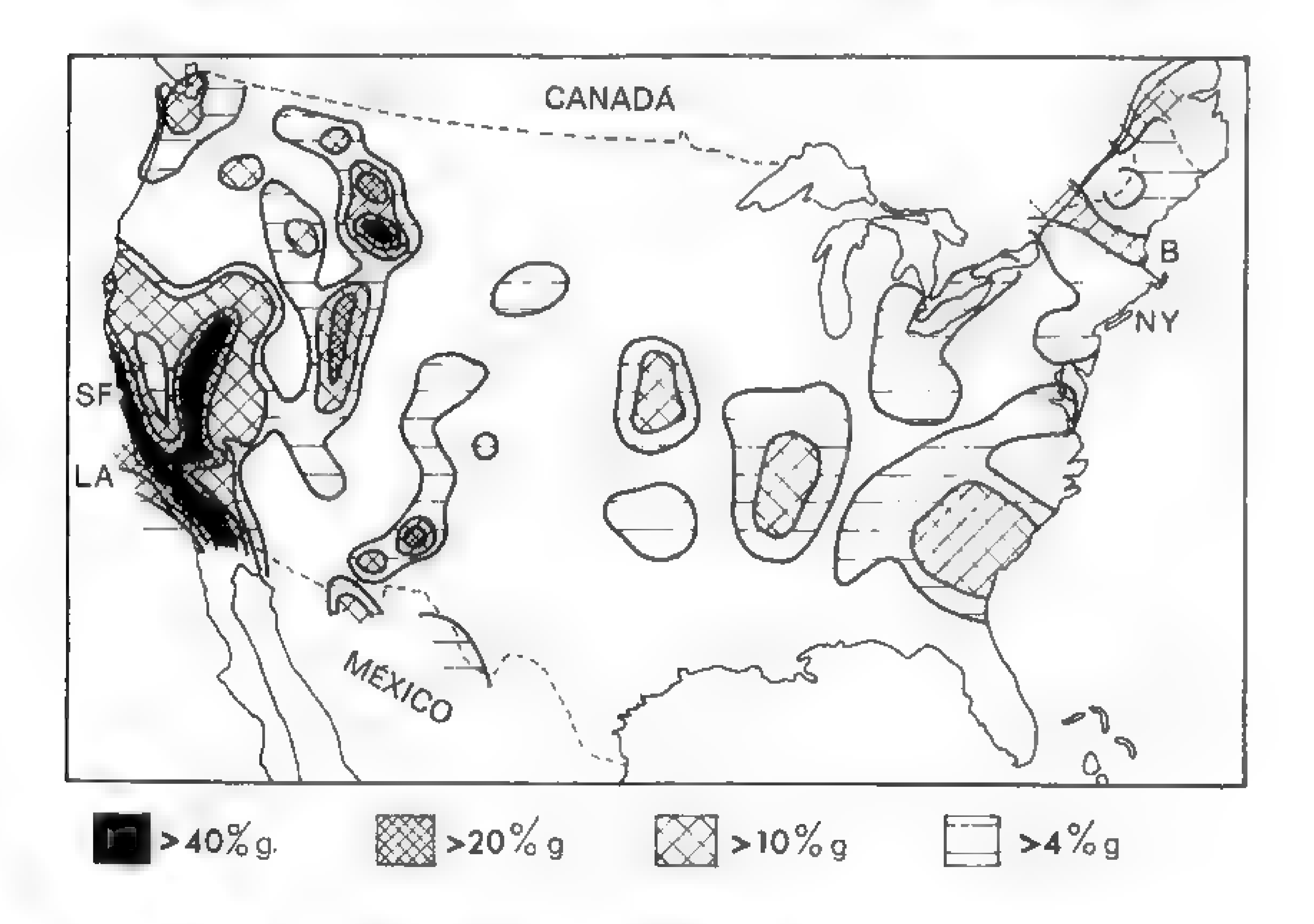


Fig. 35. Mapa de riesgo sísmico de Estados Unidos. En él se muestran los grados de vibración del suelo, expresados en forma de porcentajes de aceleración gravitacional en sentido horizontal, que pueden producirse en los próximos 50 años. Los valores máximos a lo largo de la falla de San Andrés alcanzan el 80 % de g. SF = San Francisco, LA = Los Ángeles, B = Boston, NY = Nueva York.

No obstante, para estar satisfactoriamente protegidos ante los riesgos sísmicos se necesita mucho más que una valoración correcta del riesgo y unas predicciones acertadas. Evidentemente, es necesario profundizar en las investigaciones acerca de los tipos de terrenos que deben ser evitados, de las características de los edificios que deben ser edificados, y de la conveniencia de los refugios sísmicos en determinados lugares. Es asimismo muy importante que las autoridades adopten una actitud responsable, que empleen a los especialistas que sea necesario, que se tomen sus opiniones más en serio y que les financien convenientemente. El público debe tener acceso a una información correcta, y deben tomarse las medidas adecuadas para evitar que el hombre caiga víctima de su propia estupidez o de la de las demás por avaricia o por leyes ciegamente impuestas. Debe prohibirse edificar cualquier tipo de construcción sobre fallas, tierras propensas a los deslizamientos, terrenos embebidos de agua y sectores previamente azotados por terremotos. En las zonas costeras con riesgo de tsunamis deben instalarse los sistemas de alarma adecuados y deben construirse refugios anti-tsunamis, al mismo tiempo que deben habilitarse las medidas necesarias para facilitar la evacuación de la población. En el Pacífico ya existe un sistema de alarma anti-tsunamis en el que participan la Unión Soviética, Japón y los Estados Unidos. Existe la esperanza de que tras este prometedor inicio pueda instalarse en los próximos años un sistema mundial de alerta anti-tsunamis.

Uno de los avances científicos más notables de los últimos años es la posibilidad que existe de evitar la repetición de grandes terremotos a lo largo de fallas conocidas favoreciendo la disipación continua de los esfuerzos acumulados en las rocas, en lugar de dejar que éstos se disipen por sí solos de forma violenta. En 1966, científicos del Servicio Geológico de los

Estados Unidos se dieron cuenta de que la inyección a elevadas presiones de residuos líquidos industriales hacia el subsuelo provocaba ligeros temblores de tierra en los alrededores de Denver, Colorado. Después de varios experimentos, que se prolongaron por espacio de varios años, llegaron a la conclusión de que la inyección controlada de líquidos a altas presiones podía incrementar la dilatancia de las rocas y lubricar los planos de falla en las regiones potencialmente peligrosas. Esto haría que violentas sacudidas separadas por largos intervalos de tiempo fuesen reemplazadas por pequeños movimientos de reptación, continuos o casi continuos, a lo largo de los segmentos de la falla deseados, suprimiendo así todos los terremotos de intensidad elevada que pudieran amenazar vidas humanas. Esta esperanzadora hipótesis puede ser puesta a prueba en un próximo futuro.

Mientras los terremotos matan y destruyen sin un gasto excesivo de las fuerzas naturales involucradas, no puede decirse que eso también sea cierto en el caso de los volcanes. Los riesgos volcánicos pueden pertenecer a tres clases principales: coladas de lava, lluvias piroclásticas (caída de cenizas) y flujos piroclásticos (flujos de cenizas, nubes ardientes, avalanchas incandescentes, derrames basales, coladas de barro volcánico y otros fenómenos similares). No hay ninguna duda de que un gran volcán en plena erupción constituye la mayor expresión de las fuerzas de la naturaleza que pueda darse sobre la Tierra. Cuando esas fuerzas se dirigen hacia zonas densamente pobladas (quizás debido a un desarrollo indiscriminado y a la falta de planificación), pueden causar tremendas mortandades. Sin embargo, y a pesar de todo, en la actualidad los vulcanólogos experimentados son capaces de reconocer los volcanes que pueden engendrar horrores de la categoría de los flujos piroclásticos y de delimitar las zonas de máximo peligro potencial. Por tanto, hoy en día nuestros conocimientos vulcanológicos pueden contribuir eficazmente a mitigar las pérdidas humanas y materiales que los volcanes son capaces de originar.

Las coladas de lava más peligrosas son las que se producen en las erupciones de derrame, en el curso de las cuales grandes volúmenes de lava fluyen con gran rapidez a través de una o varias fisuras; estas coladas pueden cubrir áreas muy extensas. La erupción del Laki en el año 1783, en Islandia, tenía estas características. Los daños que una colada de lava causa en las tierras agrícolas son absolutos. Existen otros tipos de coladas de lava igualmente destructivas; éstas constituyen ríos más o menos continuos que pueden recorrer distancias considerables, cortando las vías de comunicación y ocasionando graves daños materiales. Sin embargo, hay varias maneras de mitigar los efectos destructivos de las coladas de lava: la colada puede ser desviada hacia valles próximos en donde causará menos daños, el río de lava puede ser bombardeado o dinamitado para obligarle a cambiar de dirección, o también pueden excavarse trincheras y canales alrededor de las poblaciones con el fin de desviar la lava hacia zonas no habitadas. Sin embargo, en Sicilia ninguno de estos procedimientos puede ser aplicado debido a una antigua ley que prohíbe desviar las coladas de lava. La ley fue promulgada en 1669, año en que se produjo la mayor erupción conocida hasta la fecha en el monte Etna, en la que murieron 100.000 hombres, mujeres y niños; en el curso de la misma se formó un gran río de lava que avanzaba hacia Catania. Un tal Diego Pappalardo organizó una banda de hombres intrépidos que, protegiéndose del calor mediante pellejos de vaca humedecidos, consiguieron abrir una brecha en uno de los flancos de la colada de lava. Sus esfuerzos tuvieron éxito, y la lava se desvió siguiendo la brecha que ellos habían abierto; el río que había estado amenazando a Catania se detuvo. Sin embargo, su intervención creó otro problema, ya que entonces la colada se encaminó hacia el pequeño pueblo de Paterno. Varios centenares de paterninos enfurecidos por aquella maniobra atacaron y ahuyentaron a Pappalardo y su grupo. Falta de vigilancia, la brecha se cerró pronto y la corriente principal siguió descendiendo hacia Catania, destruyendo finalmente todo el sector occidental de la ciudad. Desde entonces, la desviación de las lavas del Etna ha estado prohibida. El intento que se hizo en 1973, en Heimaey, para detener la colada de lava regándola con agua dio lugar a la formación de una costra en su superficie, aunque evidentemente el flujo interno no se detuvo. Únicamente el cese de la actividad volcánica impidió que la ciudad de Vestmannaeyjar fuese totalmente destruida y, quizás, enterrada por los productos volcánicos. De todo lo anteriormente expuesto se deduce que para tener éxito y no acarrear problemas secundarios, las diversiones de las corrientes de lava requieren una topografía favorable. La ciencia de la vulcanología ha progresado hasta tal punto que hoy en día, y dentro de las 48 horas siguientes a la formación de un nuevo río de lava, ya es posible determinar la distancia total que el mismo va a recorrer, la hora en que llegará a lugares dados y la trayectoria que seguirá. Durante algunas erupciones recientes, este tipo de previsiones han sido correctas en un 95 % de sus planteamientos. Es muy poco frecuente que las coladas de lava causen números elevados de víctimas; sin embargo, la destrucción de las propiedades son totales. Las tierras agrícolas cubiertas por lava tardan mucho tiempo en recuperarse, excepto en los climas húmedos tropicales, en los cuales los procesos de meteorización actúan de forma acelerada.

Mucho más peligrosas que las coladas de lava son las lluvias piroclásticas. Éstas se producen cuando un cráter volcánico expele con gran rapidez grandes volúmenes de gases cargados de fragmentos de magma asimismo

ricos en gases; la masa saliente se expande convirtiéndose en una especie de espuma que más tarde se solidifica transformándose en piedra pómez y cenizas. Los vientos pueden arrastrar a través de distancias enormes los fragmentos de piedra pómez y las cenizas, las cuales pueden depositarse muy lejos del volcán a lo largo de su eje de dispersión. Esa lluvia de partículas ligeras puede formar una fina capa sobre el suelo y dañar la vegetación alrededor del volcán. Las lluvias originadas por las erupciones de tipo estromboliano suelen ser más densas y pueden despojar a los árboles de sus hojas y ramas y ocasionar graves desperfectos en las ciudades que se hallen eventualmente cerca. Durante la erupción del volcán Eldjfell, en Heimaey, la lluvia estromboliana de cenizas fue lo bastante densa para ocasionar el hundimiento de los edificios con techo llano que no pudieron resistir el peso de la capa de cenizas. En este caso, puede considerarse que los habitantes de Heimaey tuvieron suerte, ya que, después de la erupción, sólo tuvieron que limpiar la ciudad de la gruesa capa de cenizas que la había cubierto parcialmente, además de reparar los tejados, claro está.

Las lluvias de cenizas más densas son las producidas por las erupciones plinianas. Estas destructivas lluvias de cenizas provocan el hundimiento de la mayoría de techos, pero a menudo suelen dejar los muros intactos. Las erupciones plinianas liberan volúmenes enormes de cenizas en intervalos de tiempo relativamente cortos; eso acarrea cortes en las comunicaciones, imposibilita el avance de los vehículos y las personas y dificulta la evacuación de las ciudades afectadas. Las partículas de cenizas pueden causar daños en la dentición de los animales herbívoros, así como en sus estómagos. A veces, las cenizas volcánicas contienen elementos venenosos que pueden continuar en el suelo hasta el punto de convertir los pastos en un auténtico veneno mortal. Las lluvias de cenizas también pueden alterar el equilibrio ecológico, ocasionando la muerte de especies beneficiosas que pueden ser reemplazadas por otras más dañinas para la agricultura. Esto fue lo que ocurrió a raíz de la erupción del volcán Paricutín en 1943; una plaga de escarabajos comedores de caña arruinó la cosecha de caña de azúcar. Los incendios originados por las coladas de lava constituyen un serio peligro, ya que pueden destruir las zonas forestales y las construcciones de madera; la caída de bombas volcánicas incandescentes en medio de las lluvias de cenizas también puede provocar incendios, particularmente en el interior de las casas, ya que pueden atravesar los techos y prender en los suelos, las cortinas y los muebles, como ocurrió durante la erupción de Heimaey.

En general, las ciudades y los pueblos no tardan mucho tiempo en recuperarse de las lluvias de cenizas; en algunas circunstancias incluso es posible desenterrar las casas sepultadas por la capa de cenizas. Las cenizas

ofrecen una amplia superficie a los procesos de meteorización y, dadas ciertas condiciones climáticas y agrícolas, pueden convertirse con relativa rapidez en suelos extremadamente fértiles; es por esta razón que las vertientes de muchos volcanes peligrosos están densamente pobladas en sus pendientes bajas. Después de la erupción, la gente tiende a regresar a sus antiguas casas con el fin de cultivar las tierras que hayan quedado libres de restos volcánicos y con la intención de plantar lo más rápidamente posible en los nuevos campos de cenizas y lava. Quizás la respuesta correcta es promulgar leyes que impidan la reinstalación de núcleos de población de cierta importancia en las zonas repetidamente devastadas, y crear al mismo tiempo buenos sistemas de acceso para permitir la explotación desde cierta distancia una vez la tierra esté recuperada para la agricultura. Cuanto menos, estas medidas harían disminuir el número de víctimas y de edificios destruidos durante futuras y previsibles erupciones. Evidentemente, algunas erupciones plinianas tienen unas proporciones tan gigantescas, y asolan superficies tan extensas, que harían que estas medidas fuesen completamente inaplicables; sin embargo, hay muchas zonas volcánicas en el mundo en las que valdría la pena su adopción, tanto en términos humanos como económicos.

Los flujos piroclásticos —avalanchas incandescentes y nubes ardientes— constituyen la más devastadora de todas las manifestaciones volcánicas; su paso origina la destrucción más absoluta. Sin embargo, después de estas manifestaciones la tierra suele ser fácilmente recuperada y la población también tiende a reinstalarse en las zonas de peligro, olvidando completamente que la catástrofe recién acaecida puede repetirse. La muerte causada por una nube ardiente es algo especialmente horroroso; algunos mueren instantáneamente debido a la inhalación de polvo calentado al rojo; otros muchos mueren de asfixia, por profundas quemaduras o son sepultados por los edificios que se derrumban. Únicamente tienen alguna probabilidad de supervivencia los edificios de ladrillo bien construidos, aunque no ocurre siempre así. Tal y como vimos en el capítulo 5, la ciudad de St. Pierre, en la isla de la Martinica, quedó totalmente arrasada después de que pasase por ella una nube ardiente el año 1902. Los incendios secundarios ocasionan también grandes daños; el hambre y las enfermedades subsiguientes pueden hacer que se incremente sensiblemente el número final de víctimas. Las nubes ardientes son flujos incandescentes constituidos por una masa fluidificada de partículas de roca calentadas al rojo. Por este motivo se comportan como líquidos y fluyen fácilmente siguiendo los valles fluviales y las depresiones del terreno. Tienen una gran movilidad y se desplazan a velocidades de más de 160 kilómetros por hora en los sectores de elevada pendiente (p. ej., en las vertientes más abruptas del volcán); en las

zonas suavemente inclinadas del pie de los volcanes se desplazan a menor velocidad, quizá a unos 60 kilómetros por hora.

La "nuée" de St. Pierre recorrió los 7 kilómetros que separaban la ciudad del cráter del Mont Pelée en tan sólo tres minutos, lo que da una velocidad media de 140 kilómetros por hora. En consecuencia, ninguna alarma habría servido de nada una vez salida la nube del cráter. A pesar del terrorífico poder destructivo de estos flujos, se han dado algunos casos increíbles de supervivencia. Durante la erupción del año 1951 en el monte Lamington, en Papuasia-Nueva Guinea, las nubes ardientes avanzaron siguiendo los valles fluviales y matando prácticamente todo lo que encontraban a su paso. Sin embargo, algunas de las personas situadas en el interior de las piñas humanas que el terror había contribuido a crear llegaron a sobrevivir; sin duda, los que se hallaban en el exterior de las piñas actuaron como escudo protector. En otro lugar, un hombre, al ver que la nube se aproximaba, se tiró de cabeza al río y buceó en su interior; cuando no pudo aguantar más la respiración, sacó la cabeza; en el exterior lo único que había era un aire caliente, apenas respirable, que le abrasó la boca; a pesar de todo, siguió sumergiéndose y saliendo a respirar una y otra vez hasta que el peligro hubo pasado. Los que han experimentado el paso de una nube ardiente, y han sobrevivido para contarlo, hablan de una sensación de calor intenso y sofocante durante los pocos instantes que tarda en pasar la nube.

Las zonas afectadas por estas nubes siguen siendo consideradas peligrosas durante un período importante de tiempo después del primer flujo, ya que es posible que en el volcán se formen aún otras nubes ardientes. Muy a menudo, en el período final de estas erupciones, se forma en el cráter un domo o un lomo de lava. Estos domos deben ser vigilados cuidadosamente, ya que la zona no puede considerarse en su totalidad a salvo hasta que el domo haya finalmente cesado de crecer. Es muy dudoso que el hombre pueda llegar alguna vez a combatir con posibilidades de éxito este tipo de manifestaciones volcánicas de tamaño mayor, capaces de acumular enormes espesores de ignimbritas (rocas depositadas por un flujo piroclástico) a lo largo y ancho de muchas decenas de kilómetros alrededor del volcán. Se sabe que estos flujos han recorrido las montañas del este de Nápoles, por ejemplo, y que han dejado sepultadas inmensas extensiones bajo muchos metros de cenizas calientes. El sur de Tenerife también está cubierto por muchos kilómetros cuadrados de ignimbritas procedentes de un antiguo cráter situado en Las Cañadas del Teide. Los principales depósitos de ignimbritas que se conocen tienen centenares de metros de espesor y pueden haber llegado a cubrir áreas de centenares de kilómetros de diámetro. En el pasado se han producido muchos flujos piroclásticos descomunales, y no cabe duda de que eventos devastadores de parecidas características volverán a producirse en el futuro. La única medida sensata a tomar ante este tipo de riesgo volcánico es la evacuación total de la zona de peligro.

Las coladas de barro constituyen otro tipo de riesgo que puede estar causado por las lluvias torrenciales que a menudo acompañan a las grandes erupciones volcánicas. Cuando llueve torrencialmente, la capa de cenizas calientes, blanda y fácilmente disgregable, que recubre las laderas del volcán puede dar lugar rápidamente a una o varias coladas de fango ardiente (lahar). Cuando intensas lluvias caen sobre nubes ardientes ya desarrolladas o en proceso de formación, se forman otras variedades de lahares, y también cuando las nubes ardientes chocan con grandes cuerpos de agua, como por ejemplo los ríos. Las coladas de barro se desplazan de manera parecida a las nubes ardientes, pero son más sensibles a las influencias topográficas, lo que significa que bajo ciertas circunstancias pueden desviarse. Su velocidad, aunque no tan alta como la de las nubes ardientes, las hace también altamente peligrosas. Un rasgo característico de estas coladas es su elevada potencia mecánica (transportan fácilmente bloques de 5 a 10 metros de diámetro), a la cual deben su gran poder destructivo. Una erupción en el interior de un cráter ocupado por un lago es siempre muy peligrosa. Pueden formarse coladas de barro con gran rapidez. Si las aguas del lago que salen despedidas en forma de gotas o recubriendo partículas sólidas son muy ácidas, pueden producir graves quemaduras químicas, tal y como ocurrió durante la erupción del volcán Kawah Idjen, en Java, en el año 1936.

Otro riesgo que a menudo acompaña a las grandes erupciones volcánicas que se producen en las inmediaciones de mares someros es la formación de tsunamis gigantes que pueden barrer por completo regiones costeras enteras con una enorme pérdida de vidas humanas. Tal y como ya hemos visto, la mayor parte de víctimas producidas por la erupción de Krakatoa en 1883 se debieron a esta causa.

A veces, las manifestaciones volcánicas están acompañadas por la emisión de gases venenosos y asfixiantes, como el dióxido de carbono. Estos gases se acumulan en los agujeros y en los sótanos de los edificios, y han ocasionado muchas víctimas en el pasado. En 1947, el dióxido de carbono originó la muerte de muchas ovejas durante la erupción del volcán Hekla, en Islandia; se sabe que en 1973 un hombre murió en Heimaey a causa de los gases tóxicos.

A pesar de las características de estos riesgos, el hombre puede hacer muchas cosas para evitar la pérdida de vidas humanas inocentes y para aliviar el sufrimiento que las erupciones volcánicas suelen provocar. Para

Fig. 36. Comparación esquemática entre las superficies afectadas por algunas grandes erupciones volcánicas. Los tres arcos que representan distancias de 10, 15 y 20 km a partir del cráter muestran la extensión aérea de las zonas dañadas. Algunos flujos piroclásticos andinos, y algunas lluvias piroclásticas prehistóricas caribeñas y centroamericanas, incluso han excedido con creces esta escala.

los vulcanólogos, el estudio de los depósitos de antiguas erupciones es la tarea más útil que pueden llevar a cabo porque en ellos está registrada toda la actividad volcánica precedente; y estos estudios constituyen la mejor guía para determinar qué es lo que probablemente ocurrirá en el futuro. Cuando han sido caracterizados los tipos de actividad dominantes en un volcán determinado, pueden delimitarse las zonas de máximo peligro. Cuando una erupción volcánica está en curso, se pueden elaborar planes de emergencia. Si se espera una erupción particularmente importante, aún se está a tiempo de evacuar la zona de riesgo. En las pequeñas erupciones sólo es necesario evacuar las zonas de máximo peligro. Si se prevé la formación de nubes ardientes, la topografía preexistente puede ser modificada con el fin de favorecer la desviación de los flujos (una acción de este tipo aún no se ha intentado nunca). Este tipo de modificaciones topográficas deberían llevarse a la práctica independientemente de si la erupción ha comenzado o no, con tiempo suficiente y en vista al futuro. Las ciudades situadas en los bordes o en el centro de valles que arranquen de las laderas de un volcán son altamente vulnerables. Si existe algún valle adyacente, sería posible construir una presa o dique en el primer valle y abrir un paso hacia el valle vecino, gracias al cual podrían ser desviados eventuales flujos peligrosos. Estas obras podrían canalizar de manera muy efectiva pequeñas nubes, coladas de barro y coladas de lava hacia lugares en los que no pusiesen en peligro vidas humanas. En las ciudades situadas en las zonas peligrosas deberían construirse refugios subterráneos en los que pudiese guarecerse la población ante el paso de una nube ardiente. Los edificios deberían ser especialmente diseñados y construidos con este fin. Los tejados, por ejemplo, deberían estar muy inclinados (al menos 35°) para evitar la acumulación de grandes espesores de cenizas; además, deberían estar construidos en materiales incombustibles resistentes que no pudiesen ser atravesados fácilmente por fragmentos incandescentes y bombas, y evitar así el incendio del interior de las casas. Por el mismo motivo, sería, muy conveniente proteger las ventanas. Los animales domésticos son especialmente vulnerables durante las erupciones volcánicas; deberían instrumentarse las medidas necesarias para trasladarlos a lugares seguros mientras durase el peligro. También es necesario elaborar planes de evacuación para las áreas costeras susceptibles de ser azotadas por tsunamis. Las leyes deberían impedir la edificación en costas particularmente peligrosas. En algunas ocasiones es posible drenar los lagos de cráter, para mantener la altura de las aguas a un nivel de seguridad —esto se hizo en el volcán Kelut, en Java—, aún teniendo en cuenta que después de cada erupción queda destruido todo el sistema de drenaje. Una actuación tan simple como ésta puede evitar la formación de peligrosas coladas de barro.

Quizás la mejor manera de combatir los riesgos volcánicos es elaborar previsiones generales y específicas de su actividad, y tomar medidas precautorias como las que acabamos de enunciar. Debería haber siempre en el lugar apropiado un vulcanólogo experimentado que informase acerca de la evolución de la erupción. En la última década se han aprendido muchas cosas nuevas acerca del comportamiento de los volcanes y del tipo de erupción que cabe esperar en una determinada área volcánica; estos conocimientos se están consolidando rápidamente gracias a intensas investigaciones. Ciertamente, ya ha llegado el momento en que deberíamos comenzar a aplicar nuestros conocimientos acerca de los volcanes en beneficio de la humanidad. Debido a la atracción natural y lógica que el hombre experimenta por las fértiles tierras volcánicas, es necesario que exista cuanto menos un grado mínimo de vigilancia. Los volcanes próximos a zonas densamente pobladas merecen una atención especial, ya que cualquier erupción de cierta importancia en los mismos puede tener consecuencias nefastas tanto social como económicamente. Deberían prepararse y divulgarse ampliamente mapas de riesgo volcánico en los que estuviesen señalizadas las zonas sujetas a un mayor peligro potencial. También es necesario efectuar reconocimientos precisos que permitan conocer qué tipo de erupción va a producirse en el futuro y que proporcionen a las autoridades los suficientes elementos de juicio para legislar y controlar los trabajos de edificación en dichas áreas. Desgraciadamente, la gente acude como moscas a estas peligrosas zonas, atraída por la riqueza de su suelo. La descomposición de las cenizas y las rocas volcánicas da lugar a la formación de algunos de los tipos de suelos más fértiles del mundo y las personas que dependen de la agricultura para su supervivencia se sienten atraídas por las fértiles pendientes de los grandes volcanes. En Italia, después de cada erupción del Vesubio y del Etna la gente volvía a instalarse en las laderas de ambos volcanes para proseguir su estilo de vida acostumbrado. Durante los largos períodos de reposo, las granjas y los campos de cultivo van escalando progresivamente las faldas de los volcanes. Si en el futuro se produjesen erupciones parecidas a las de los años 79 en el Vesubio y 1669 en el Etna, la cantidad de vidas humanas que se perderían sería enorme. Hoy en día, es de esperar que la mayoría de autoridades civiles estén lo bastante al tanto de la situación como para ordenar la rápida evacuación de la zona tan pronto como un volcán avance hacia una nueva erupción catastrófica. Únicamente un concienzudo examen de los detalles observados durante el reconocimiento de un volcán sospechoso revelará el tipo de erupción que dicho volcán es capaz de engendrar. Este tipo de trabajo es algo más serio que una simple predicción general; implica efectuar la interpretación geológica de todos los depósitos acumulados durante antiguas erupciones; en

este sentido, cada capa de cenizas es como la página de un libro en el que está escrita la historia del volcán en cuestión; los resultados de las investigaciones de campo deben ser cotejados con el análisis de las descripciones y datos históricos referidos a erupciones previas. La predicción específica puede llegar a ser muy precisa, pero es muy cara y en ella se utilizan instrumentos muy sofisticados; además, implica el análisis de los datos geofísicos de volcanes sospechosos. Un reconocimiento general puede proporcionar una idea aproximada acerca del futuro comportamiento de un volcán, todo ello basado en la premisa de que el comportamiento pasado es la mejor guía para conocer el probable comportamiento futuro. Generalmente, un volcán con una larga historia de violentas erupciones explosivas, separadas por largos períodos de reposo, quizás salpicados por pequeños eventos parecidos, es un volcán sospechoso. Si tiene un amplio pasado de violencia, es altamente probable que continúe comportándose violentamente en el futuro. La utilidad principal de las predicciones de carácter general es que sirven para alertar a los vulcanólogos acerca de posibles nuevas erupciones, dándoles así el tiempo necesario para poder instalar los instrumentos geofísicos necesarios para poder controlar más de cerca la actividad del volcán y elaborar predicciones más específicas.

El registro de la actividad pretérita de los volcanes es, en algunos casos, lo bastante completa para que los vulcanólogos determinen su periodicidad. A corto término, este tipo de análisis ha demostrado su eficacia en la predicción de las explosiones que acompañan a determinados tipos de erupciones. Sin embargo, a más largo plazo las predicciones son imprecisas, a menos que se utilicen otras técnicas más específicas. Desafortunadamente, sólo hay en el mundo un pequeño número de volcanes suficiente documentados para elaborar predicciones de carácter general. Cuando no hay registros históricos disponibles, la única manera de conocer la historia pretérita de un volcán es llevando a cabo un estudio vulcanológico de la región en que está enclavado. Es necesario examinar detalladamente y correlacionar todos los depósitos acumulados durante antiguas erupciones; sólo entonces es posible dibujar los mapas de riesgo volcánico, calcular el volumen y la magnitud de las erupciones pretéritas, y determinar aproximadamente la periodicidad de la actividad del volcán.

Este tipo de estudios exhaustivos revelarán asimismo gran cantidad de detalles acerca de las antiguas erupciones: si estaba lloviendo, si se formaron coladas de barro o flujos piroclásticos, si las erupciones estaban acompañadas por violentas descargas eléctricas, y si las paredes del cráter se derrumbaron hacia el interior del mismo durante los períodos tranquilos para ser voladas otra vez al recomenzar nuevas erupciones. La cartografía detallada de los depósitos de antiguas erupciones puede proporcionar va-

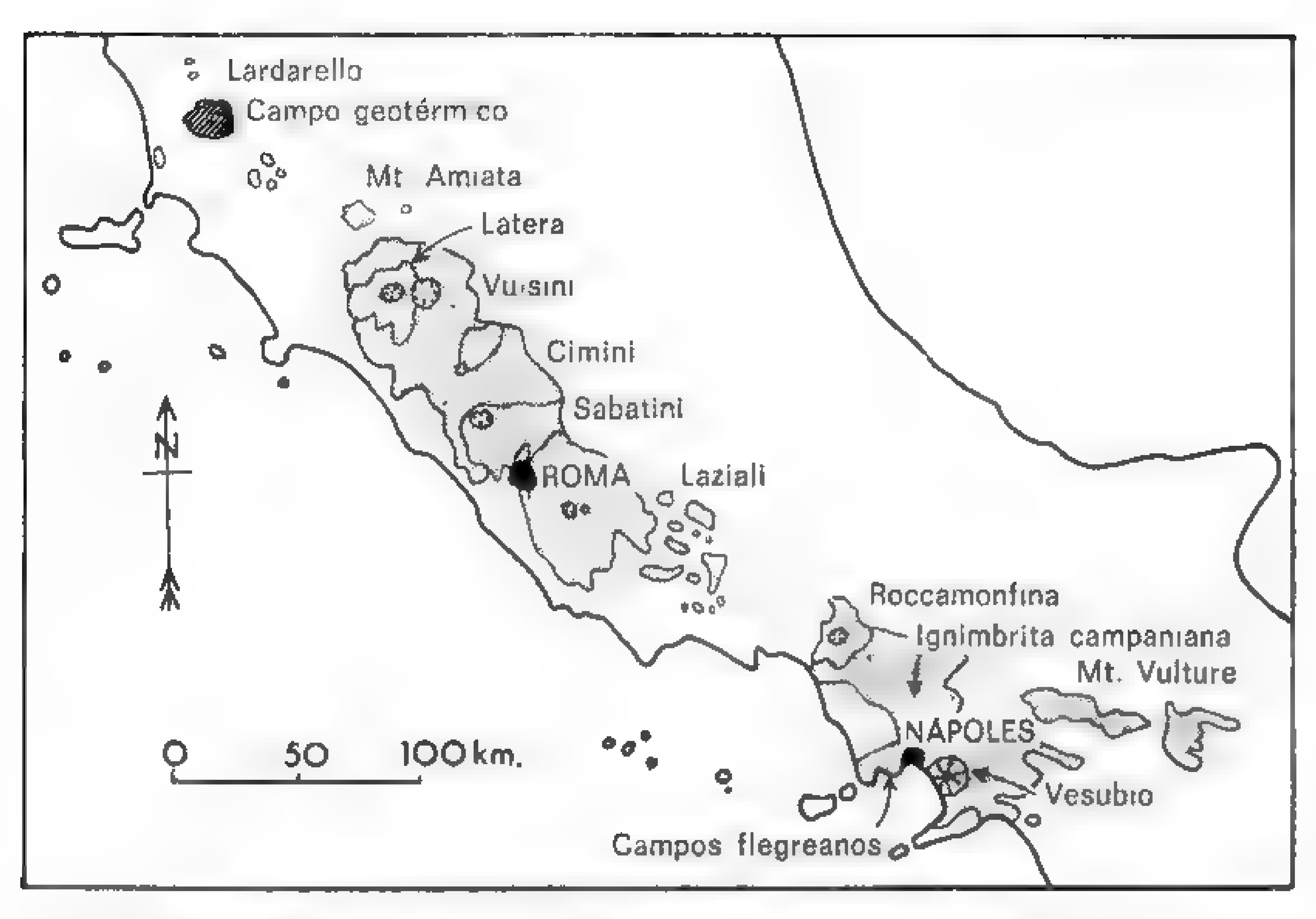


Fig. 37. Mapa de situación de los volcanes centro-italianos en el que se muestran las áreas afectadas por antiguas erupciones explosivas procedentes de centros volcánicos caracterizados por largos períodos de reposo. Además de Roma, se considera que Nápoles también puede ser puesta en peligro por futuros eventos.

liosas informaciones acerca de la dirección y velocidad del viento, la rapidez con que los productos volcánicos eran expulsados, y la altura de la columna eruptiva. Pueden decirnos si las expulsiones de material se producían en dirección vertical o inclinada, así como la profundidad y la presión probables de las diferentes explosiones que se produjeron. Este tipo de investigaciones han demostrado, por ejemplo, que el volcán de Tenerife, en las Islas Canarias, el Teide, tiene una larga historia de erupciones extremadamente violentas. En los últimos 30.000 años han habido más de 15 erupciones acompañadas por lluvias de piedra pómez, algunas de ellas de grandes proporciones; durante las mismas, se formaron grandes flujos piroclásticos a partir de aerosoles volcánicos incandescentes. Si retrocedemos un poco más en la historia de ese volcán, veremos que en los 30.000 años precedentes se produjeron más de 21 lluvias de piedra pómez y más de seis flujos piroclásticos adicionales; esto sin contar ni las numerosas lluvias menores de cenizas ni las coladas de barro que también se produjeron. Algunas de las erupciones prehistóricas ocurridas en Tenerife tuvieron unas proporciones tan importantes como las de la famosa erupción de Krakatoa del año 1883. En la actualidad el volcán sigue vivo, aunque duerme, y hay fumarolas activas en su cráter somital.

En las Azores, la isla de San Miguel tiene una larga historia de actividad violenta, con unas 26 erupciones (10 de ellas de grandes proporciones) en el curso de los últimos 5.000 años. La ciudad de Guadalajara, en México, está construida sobre los depósitos del vecino volcán La Primavera, en el cual se han producido hasta 12 grandes erupciones acompañadas por flujos piroclásticos extremadamente violentos, algunas en un antiguo lago-cráter, y por lluvias de piedra pómez. En el centro de Italia hay asimismo algunas gruesas ignimbritas resultantes de los flujos piroclásticos formados en el curso de enormes erupciones prehistóricas. Roma, por ejemplo, está construida sobre uno de estos depósitos ignimbríticos. No hay ningún criterio que permita considerar extintos a los volcanes de los alrededores; simplemente, tienen períodos de reposo muy largos, de 5.000 y quizás incluso más de 10.000 años.

En el caso de las predicciones específicas, las técnicas geofísicas empleadas se basan en el hecho de que, antes de una erupción, grandes volúmenes de magma penetran en la base o superestructura del volcán. A medida que va introduciéndose, este magma calienta y altera las rocas circundantes, provocando cambios en sus propiedades físicas. Los vulcanólogos pueden medir estos cambios y detectar los terremotos originados por el ascenso del magma. Las mediciones deben hacerse a lo largo de períodos de tiempo razonables, de manera que las observaciones geofísicas puedan ser cotejadas con las visuales. Una de estas técnicas se basa en la utilización de sismógrafos muy sensibles que miden los pequeños temblores que se producen cuando un cuerpo de magma ascendente va penetrando en la base del volcán y fracturando las rocas que halla a su paso. Prácticamente todas las erupciones volcánicas están acompañadas por terremotos, hecho que no es cierto a la inversa. Estas meticulosas mediciones permiten conocer no solamente la trayectoria que el magma está siguiendo en su camino hacia la superficie, sino incluso la tasa de ascenso. Todo ello permite predecir dónde y cuándo va a producirse una erupción. No todo el magma ascendente alcanza la superficie para causar una erupción. A veces, el magma ascendente se detiene, se solidifica y se convierte en un cuerpo intrusivo.

A medida que el magma va abriéndose paso hacia la base del volcán, induce una hinchazón o abombamiento en toda la estructura del volcán. Esta intumescencia o incremento de volumen, que puede ser medida con precisión mediante inclinómetros, suele ir acompañada de numerosas sacu-

didas sísmicas. En algunos volcanes, pueden llegar a producirse 1.000 temblores diarios durante esta fase previa a la verdadera erupción. Durante la erupción del año 1955 en el Kilauea, Hawaii, se produjo una media de 15 sacudidas diarias entre los días 1 y 23 de febrero; hacia el 24, el número había aumentado hasta 100 diarias; dos días más tarde se alcanzó la cifra de 600, y al día siguiente, de 700. El día 28 de febrero la frecuencia de las sacudidas se incrementó aún más; ese día, a las 8 de la mañana, empezó la erupción. La predicción de que la erupción iba a producirse de forma inminente no estuvo basada, sin embargo, únicamente en los datos proporcionados por un solo tipo de instrumento. Con eso raramente se alcanza una precisión suficiente. Los datos obtenidos mediante inclinómetros que midieron con gran precisión la evolución de la intumescencia, complementaron los datos sismográficos.

Los inclinómetros son una especie de niveles líquidos muy sensibles capaces de medir desplazamientos tan insignificantes como de 1 mm en un kilómetro. En esencia, están constituidos por dos depósitos conectados por un largo tubo. Cualquier movimiento del líquido contenido en uno de los dos depósitos en relación con el líquido del otro provoca un cambio en la altura del líquido en ambos reservorios; esta variación de altura puede ser medida con gran precisión. Dos inclinómetros situados en ángulo recto son todo lo que se necesita para definir la dirección y el grado de inclinación. Durante los años 1958 y 1959, los inclinómetros situados en el volcán Kilauea señalaron una ligera hinchazón en la región somital. En noviembre de 1959, la tasa de intumescencia ya se había duplicado, y el 14 de noviembre los terremotos desatados en la región somital aumentaron en intensidad y número. A las 8 de la tarde de aquel día, la lava empezó a fluir por una grieta en el cráter del Kilauea Iki. La salida de considerables volúmenes de lava provocó el deshinchamiento de la región somital, convenientemente detectado por los inclinómetros; sin embargo, dentro de la semana siguiente, un nuevo hinchamiento indicó un recrudecimiento de la actividad. La erupción empezó de nuevo el día 26 de noviembre, esta vez desde el cráter principal, y se prolongó hasta el día 21 de diciembre. Sin embargo, en esta ocasión la erupción no estuvo seguida por un movimiento de subsidencia, sino por una intumescencia incluso mayor que cuando empezó la erupción. Los vulcanólogos predijeron otra erupción en un punto situado 40 kilómetros al este de la cima. El 13 de enero de 1960, se inició una nueva erupción en el lugar previamente indicado por los vulcanólogos; en el curso de la misma, un enorme volumen de más de 100 millones de metros cúbicos de lava se vertió en el mar después de haberse deslizado por las vertientes del nuevo cráter. A este hecho le siguió un rápido deshinchamiento de la región somital.

La medición de distancias puede complementar la información proporcionada por los inclinómetros. A medida que un volcán se hincha, la distancia entre dos puntos dados aumenta. Estas variaciones de distancia pueden ser medidas con gran precisión mediante instrumentos especiales que utilizan rayos láser. La hinchazón también hace variar la altura relativa de las marcas de nivel, parámetro que puede ser asimismo medido. La inyección de magma en la base de un volcán puede calentar las rocas circundantes por encima de la denominada temperatura de Curie, más allá de la cual éstas se desmagnetizan. Esto hace variar el campo magnético de algunos volcanes y puede ser detectado mediante un magnetómetro. Durante los ciclos eruptivos del volcán O-Shima, en el Japón, la inclinación magnética local puede variar hasta 30 minutos. La inyección de magma puede asimismo modificar el campo gravitacional local de un volcán, modificación que puede ser detectada gracias a los gravímetros (a pesar de que generalmente ésta es muy pequeña en comparación con el grado de precisión de los instrumentos actualmente existentes). El control de las variaciones en la composición química de los gases volcánicos es, por el momento, una técnica de valor muy limitado, que únicamente sirve como complemento de las técnicas geofísicas. Sin embargo, su futuro es muy prometedor.

El hombre depende de los volcanes, en ciertas partes del mundo más que en otras. Los volcanes proporcionan tierras fértiles, recursos minerales (depósitos de cobre porfiríticos, materiales de construcción ligeros) y, a veces, energía geotérmica. Mucha gente vive en la actualidad en las inmediaciones de volcanes potencialmente peligrosos como cosa corriente. En todo el mundo, muchas ciudades están "al alcance" de volcanes vivos, aunque temporalmente dormidos; Portland, en Oregón, está situada al pie del monte Hood; Guadalajara, en México, está a pocos kilómetros de La Primavera; la ciudad de Arequipa, en Perú, está a los pies del volcán El Misti, y Roma, como ya hemos visto, está rodeada de volcanes potencialmente peligrosos y podría desaparecer durante una erupción. El riesgo, admitámoslo, es hipotético, aunque es geológicamente cierto que volcanes como éstos entrarán en erupción en algún momento del futuro. Es dudoso que las predicciones y evacuaciones sean capaces de evitar las tremendas mortandades que tales erupciones podrían ocasionar. Muy pocos países están lo bastante alerta ante el riesgo volcánico, y generalmente la postura oficial es "esto no puede suceder aquí". Pero sí puede. Quizás sólo la repetición de desastres volcánicos en un próximo futuro será capaz de convencer a los gobiernos de la necesidad de estudiar y controlar la evolución de los volcanes.

Si, tras considerar los riesgos sísmicos y volcánicos, se presenta la ne-

cesidad imperiosa de crear un organismo internacional encargado de promover y coordinar los esfuerzos investigadores mundiales y las tareas destinadas a mitigar los efectos de este tipo de desastres naturales, dicha necesidad se vuelve ineludible si se tiene en cuenta el posible riesgo de bombardeos extraterrestres catastróficos. Imaginemos, por unos momentos, la secuencia de eventos que se sucederían si un gran cuerpo extraterrestre se estuviese aproximando hacia la Tierra. Es muy probable que la primera voz de alarma de que tal asteroide intruso se estuviese acercando sería dada por alguno de los entusiastas astrónomos aficionados u "observadores de estrellas" que han convertido la contemplación del cielo en su pasatiempo favorito. Los medios de comunicación, considerando las posibles consecuencias catastróficas, se encargarían de dar publicidad al asunto basándose, inicialmente al menos, en argumentos poco científicos que estuviesen al alcance del público en general. A esto le sucederían infructuosas controversias científicas, en las que algunos expertos ridiculizarían las observaciones efectuadas por un simple astrónomo aficionado, mientras que otros, si bien confirmarían tales observaciones, no se pondrían de acuerdo acerca de las posibles consecuencias del evento. Algunas sectas religiosas anunciarían la inmediata y total destrucción del mundo, de acuerdo con sus dogmas y profecías. Al cabo de cierto tiempo, y después de haber decidido que el asunto era lo bastante importante para justificar el abandono provisional de las tareas rutinarias (control de satélites artificiales y sondas espaciales, vigilancia ante posibles misiles enemigos y satélites espías y asesinos), las agencias u organizaciones espaciales oficiales empezarían a informar en secreto a sus gobiernos respectivos. Cuando los asesores científicos ya hubiesen convencido a los gobernantes de la existencia de un peligro real, todo el mundo se preguntaría qué es lo que debería hacerse. Lo sucedido en 1978, cuando un satélite nuclear soviético se estrelló en el Canadá, parece indicar que la primera reacción sería la de mantenerlo todo bajo la capa del mayor secreto.

Evidentemente, la divulgación de estas informaciones sería una bomba política a escala mundial. Todo el mundo se daría inmediatamente cuenta de que si el impacto se produjese en una de las superpotencias, el equilibrio global de fuerzas cambiaría drásticamente. Teniendo en cuenta cómo son los políticos, esto constituiría su primera preocupación. Las conversaciones urgentes y secretas con sus aliados tendrían prioridad sobre las reuniones públicas y los encuentros Este-Oeste destinados a coordinar la respuesta mundial ante tal catástrofe. No obstante, llegaría un momento en que la necesidad de dar una respuesta mundial al problema se impondría. Todo este proceso acarrearía una pérdida de tiempo considerable, ya que se trataría de una situación sin precedentes y no existirían los canales adecuados

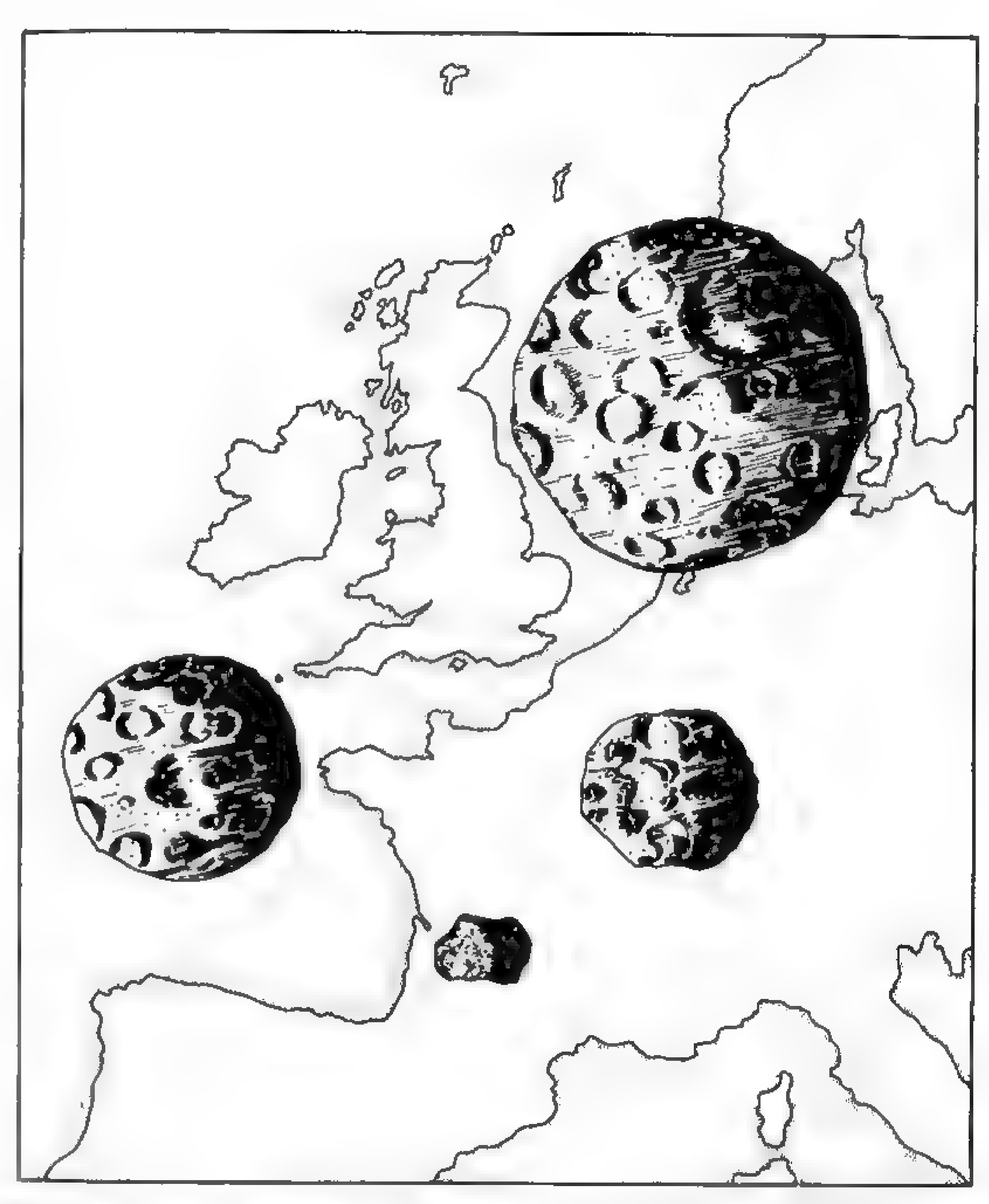


Fig. 38. Cuatro de los mayores asteroides conocidos: Ceres (770 kilómetros de diámetro), Palas (480 kilómetros de diámetro), Vesta (380 kilómetros de diámetro) y Juno (190 kilómetros de diámetro). Una colisión con cualquiera de estas monstruosas masas de restos solares destruiría Europa por completo. La colisión con asteroides de menor tamaño tendría consecuencias cataclísmicas si se produjese en zonas densamente pobladas. Como referencia, la Tierra tiene casi 13.000 kilómetros de diámetro y la Luna alrededor de 3.500. El dibujo muestra a los cuatro asteroides reproducidos a la misma escala sobre el mapa de Europa nordoccidental.

para la divulgación de la información y la coordinación de las posibles acciones. Mientras se estuviese trabajando en busca de un acuerdo internacional definitivo y mientras la gente aún estuviese tomando plena consciencia de la gravedad del problema, la Tierra y el pícaro asteroide se habrían ido aproximando a gran velocidad hasta el punto de impacto. La prensa y la televisión mundiales se darían cuenta de la verdadera gravedad de la situación y la población empezaría a comprender el increíble peligro a que iba a enfrentarse el género humano. En algunos lugares del mundo cundiría el pánico, y los desórdenes públicos, el pillaje y la violencia serían inevitables. Durante las difíciles horas o días que faltasen para el momento del impacto, el Comité Mundial para la Catástrofe, apresuradamente constituido por científicos, militares y políticos, permanecería reunido en sesión permanente; se darían cuenta de que la única posibilidad de evitar o reducir los efectos de la colisión, el envío de todos los ingenios nucleares disponibles, entrañaría un riesgo tan grave como la propia colisión: la contaminación radiactiva del ambiente hasta niveles letales, incluso en el caso de que el intento de romper o desviar el cuerpo extraterrestre tuviese éxito. Algunos estarían convencidos de que el impacto múltiple de numerosos fragmentos altamente radiactivos sería tan peligroso como un único gran impacto sin contaminación nuclear adicional. Lamentablemente, lo más probable es que, debido a la ausencia de planes previamente pensados y de respuestas cuidadosamente elaboradas, el comité tomase decisiones inefectivas y tardías que no impedirían que el asteroide continuase irremisiblemente su trayectoria, quizá parcialmente fragmentado y contaminado radiactivamente, y golpease la Tierra con tremenda violencia.

Obviamente, si se acercasen a la Tierra varios proyectiles espaciales esta eventualidad final sería inevitable; la única medida que podría ser adoptada sería la evacuación de la zona con peligro de impacto. Sin embargo, suponiendo que se dispusiese del tiempo necesario y que existiese un plan previamente preparado, hay la posibilidad real de hacer desviar un pequeño asteroide de su trayectoria de colisión hacia una nueva trayectoria que determine la captura del mismo como satélite de la Tierra; esto incluso podría reportar algunas ventajas: se dispondría de una nueva plataforma espacial para el aterrizaje y despegue de astronaves, para la instalación de sensores remotos, para efectuar observaciones astronómicas y para construir centrales solares; además, el asteroide podría ser una posible fuente rica en minerales valiosos.

El hombre controla el futuro quizás más de lo que la mayoría de nosotros imaginamos. Es obvio que posibles guerras nucleares o biológicas deliberadas o la contaminación irresponsable del ambiente pueden afectar el

futuro de la humanidad y desencadenar catástrofes naturales de grandes proporciones. Los científicos ya están preocupados por los problemas derivados de la combustión de cantidades excesivas de hidrocarburos fósiles y por la deformación creciente de extensas regiones boscosas y selváticas, circunstancias ambas responsables del incremento de la concentración de dióxido de carbono en nuestra atmósfera, que da lugar al denominado "efecto de invernadero". Se ha calculado que si el consumo mundial de carbón, gas y petróleo, o sus derivados, continúa creciendo al ritmo actual, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se doblará al cabo de unos 50 años, con los desastrosos e irreversibles efectos climáticos correspondientes.

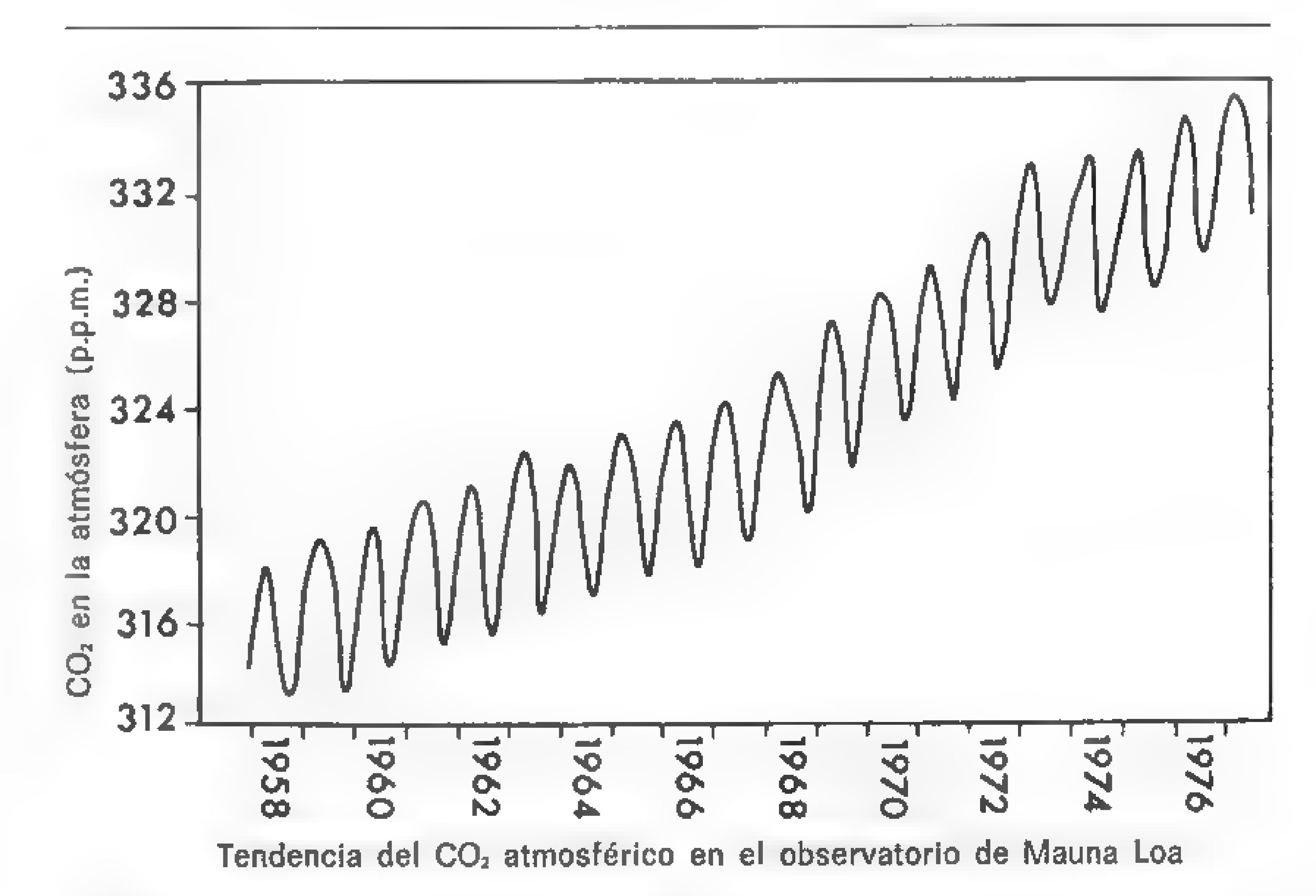


Fig. 39. Las mediciones efectuadas en el aislado observatorio barrido por los vientos de Mauna Loa, en Hawaii, muestran que el contenido promedio de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado más de un 5 % desde el año 1958 al 1976. La captación fotosintética de dióxido de carbono durante la estación de crecimiento de las plantas y su liberación subsiguiente determinan las oscilaciones estacionales de la curva —dominada por las grandes extensiones de tierras cubiertas de vegetación del hemisferio septentrional; no obstante, es evidente que el nivel medio de CO_2 en el aire está aumentando a un ritmo alarmante de casi una parte por millón anual.

En el capítulo 6 hablábamos con cierto detenimiento del riesgo de una futura catástrofe generalizada debida al avance de los hielos o a la fusión de los casquetes polares actuales. En determinados momentos, hace entre 18.000 y 6.000 años, el nivel mundial del mar ascendió a un ritmo de hasta 6 metros por siglo. Un ascenso de estas características acarrearía en el futuro unos gastos astronómicos en obras de defensa costera, las cuales, por otra parte, quizás resultarían totalmente ineficaces a largo término. El probable derrumbamiento de barreras de más de 30 ó 50 metros de altura entrañaría un riesgo inaceptable para todos aquellos que viviesen al pie de las mismas. No obstante, en los últimos 6.000 años los cambios en el nivel mundial del mar no han superado los 6-9 metros en total. En consecuencia, y mientras continuemos dentro del actual período interglacial (las indicaciones señalan que el mismo puede durar aún algo así como entre 100 y 10.000 años más), la conservación efectiva de las actuales líneas de costa no debe entrañar problemas de consideración. En Inglaterra, por ejemplo, las autoridades están bien concienciadas de los problemas con que tropezará Londres en un futuro próximo. En el estuario del Támesis, el hundimiento del suelo respecto al nivel del Mar del Norte es en promedio de unos 10 a 30 centímetros por siglo, y la configuración topográfica de las zonas costeras del este de Inglaterra —Norfolk, Suffolk, Essex, Londres y Kent— las hace especialmente vulnerables ante la combinación de mareas altas y vientos del noroeste. En el Támesis inferior, concretamente en Woolwich, se está construyendo una barrera con el fin de evitar las posibles inundaciones que futuras oleadas mareales del Mar del Norte pudiesen provocar. Los actuales indicadores señalan que durante algunos años esto será todo lo que ocurrirá. ¿Pero qué sucedería si cayesen grandes cantidades de nieve en la cuenca del Támesis con capas de hasta 10 metros (tal y como ocurrió en el sudeste de Inglaterra en febrero de 1978), las cuales fuesen rápidamente derretidas por lluvias torrenciales un día o dos antes de que la barrera fuese cerrada para evitar que una gran ola procedente del Mar del Norte causase daños en el estuario? Evidentemente, cualquier barrera en el Támesis diseñada para detener las olas del mar sería también capaz de detener las avenidas fluviales. ¡Londres sería inundada rápidamente detrás de esa barrera! Cálculos detallados indican que la posible coincidencia de esos dos factores es muy remota, pero lo mismo se dijo después de las terribles inundaciones del año 1953 en la costa Este. Por aquel entonces, los cálculos efectuados a raíz de las mismas indicaron que sólo podrían repetirse una vez cada 200 años; pero los años 1969, 1976 y 1978 las aguas alcanzaron los mismos niveles. Se ha demostrado que las mejores estimaciones disponibles efectuadas en el pasado estaban equivocadas; lo mismo puede ocurrir con las actuales previsiones.

Las mejores garantías para la supervivencia de Londres no parece que puedan ser proporcionadas por medidas a pequeña escala y "parches" a corto plazo, sino por el desarrollo de un sistema de "polders" parecido al que existe en los Países Bajos. Sin entrar en consideraciones acerca del coste económico de las obras, parece posible construir un sistema de diques entre el este de Kent y el este de Essex capaz tanto de proteger la capital de Gran Bretaña durante los próximos siglos como de convertirla en uno de los mayores y más modernos puertos del mundo; asimismo, facilitaría la construcción del tan deseado tercer aeropuerto de Londres en una zona alejada de los sectores urbanos. Otras ventajas serían la desviación del tráfico pesado que se dirige desde el centro industrial y el norte de Inglaterra hasta Europa, que de esta manera no debería pasar por la zona de Londres, el incremento de las buenas tierras agrícolas, la utilización provechosa de los limos del Támesis, la evacuación más eficaz de los residuos urbanos e industriales, y el incremento de la producción eléctrica sin necesidad de emplear combustibles fósiles. En la desembocadura del Támesis podría construirse un dique que protegiese nuevas tierras agrícolas y que fuese susceptible de ser ampliado en caso necesario; este dique no tendría por qué ser mayor que el que cierra la bocana del Zuider Zee en Holanda. Un sistema de polders adyacentes, detrás de esta barrera, podría ser utilizado con fines recreativos y para la producción de electricidad aprovechando las mareas. Este sistema de diques debería ser capaz de absorber la máxima descarga fluvial calculada durante los períodos de marea alta. Los polders principales podrían estar conectados con una serie de diques menores a lo largo de toda la costa este de Essex y Suffolk, hacia el interior de los cuales podrían desviarse las aguas cargadas de sedimentos de las grandes avenidas; con el tiempo, los depósitos aluviales resultantes podrían tener un valioso aprovechamiento. Ciertos polders podrían ser utilizados periódicamente como grandes balsas de decantación en las que podrían tratarse las aguas residuales; la acumulación de las partículas orgánicas y minerales de las mismas podría mejorar la fertilidad del suelo, una vez desecados los polders en cuestión. Cada pólder tendría diversos compartimentos capaces de ser anegados, drenados y aireados a voluntad, para repetir después el proceso siguiendo un ciclo regular de cinco a diez años. En las principales salidas de agua podrían instalarse generadores de electricidad y energía mecánica. La comunicación con un nuevo complejo de diques podría hacerse probablemente a través de una serie de esclusas gigantes. Las nuevas pistas de aviación podrían construirse sobre zonas previamente ocupadas por el mar, evitando en la medida de lo posible las alteraciones ambientales. Los problemas de ingeniería que plantea la construcción de este tipo de barreras son bien conocidos, pero su envergadura no sobrepasa la de los

problemas inherentes a la construcción del proyectado canal de Bristol, cuyo patrocinador es el Central Electricity Board.

También podría obtenerse más energía mediante el uso de una barrera exterior de generadores flotantes capaces de aprovechar la energía de las olas. Algunos ensayos de laboratorio han demostrado que es posible extraer hasta el 95 % de la energía de las olas generadas artificialmente. Una ventaja adicional derivada de la utilización de estas mini-centrales eléctricas flotantes sería su influencia protectora sobre la barrera costera interior si se instalasen a alguna distancia de la costa; además, contribuirían a crear una área de aguas tranquilas entre los flotadores y la barrera interior, suprimiendo de este modo casi por completo la erosión debida al oleaje y reduciendo, por tanto, los costes de mantenimiento de los diques y polders. El incesante aumento del precio de los combustibles fósiles podría hacer que estas ideas se convirtiesen pronto en realidad, especialmente si se utilizasen con esta finalidad los beneficios económicos derivados de la explotación del petróleo del Mar del Norte. La construcción de todo este complejo entramado de diques y polders ayudaría ciertamente a paliar el problema del desempleo, a la vez que facilitaría la creación de extensas zonas recreativas socialmente útiles.

En los primeros días de la historia de la humanidad, muchos individuos, grupos familiares y tribus enteras murieron a causa de las catástrofes naturales —tormentas, huracanes, inundaciones, incendios, terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas—, aunque el daño originado por las mismas sobre el conjunto de la especie fue de poca consideración debido precisamente a su escaso número y a su gran dispersión sobre la faz de la Tierra. Las grandes mortandades empezaron a producirse cuando los hombres se agruparon en grandes ciudades y en comunidades agrícolas. Mientras la población mundial siguió siendo escasa y el hombre mantuvo su movilidad de pastor-cazador y campesino ocasional, le fue relativamente fácil sobrevivir a las glaciaciones, los procesos y épocas de desertización, y las oscilaciones eustáticas; le bastaba con retirarse antes de que las fuerzas de la naturaleza alcanzasen cotas de peligrosidad demasiado elevadas; una vez que el peligro pasaba, no tenía más que recolonizar las tierras previamente abandonadas. En este sentido, la situación actual es menos favorable. La población mundial es muy elevada hoy en día, y con las perspectivas del próximo futuro, queda muy poco margen de maniobra. La emigración de grandes masas de gente procedentes de un hemisferio norte recién cubierto por los hielos hacia los trópicos sería prácticamente imposible. A menos que se invierta la tendencia del crecimiento de la población mundial, las perspectivas ante futuras catástrofes naturales son horrorosas.

Cuanto mayor sea y más concentrada esté la población mundial, más grande es el riesgo de futuras mortandades debidas a causas naturales. Muchos planificadores prevén que la expansión del modo de vida urbano convertirá este planeta en una "Ciudad Mundo", resultante de la transformación paulatina de las ciudades actuales en metrópolis, de éstas en megápolis, y luego en ecumenópolis. No cabe imaginar un futuro más inhumano e insoportable que el de ver toda la superficie de la Tierra tan densamente poblada como las actuales Londres, Nueva York o Tokio; muchos millones de personas morirían cada año debido a desastres naturales incontenibles e incontrolables. Un auténtico gran desastre mataría a centenares de millones de personas. Seguramente, la mayoría de personas no aceptarían esta dura e inevitable realidad de una Tierra superpoblada, a menos que la especie humana degenerase en varias subespecies mecanizadas y brutalizadas.

Obviamente, la respuesta a la pregunta: ¿Pueden el hombre y su planeta, la Tierra, sobrevivir? depende de la escala de tiempo dentro de la cual estemos examinando el problema. Dentro de 5.000 millones de años es probable que el Sol ya esté muerto y que la Tierra haya desaparecido, pero esta predicción no tiene ningún interés para el hombre actual. Los estudios evolutivos indican que nuestra especie, al igual que otras especies que han vivido y viven en la Tierra, debe experimentar un claro declive después de su período de máxima expansión; por último, será reemplazada por otras especies mejor adaptadas a las nuevas condiciones ambientales. ¿Es quizá el hombre la única criatura que escapará a este proceso natural? La respuesta debe ser no. El hombre como especie, y, desde luego, el *Homo* como género, se extinguirán algún día.

La pregunta más importante referente al hombre no es ¿Sobrevivirá?, sino ¿Pueden las catástrofes acortar seriamente las expectativas de vida de la especie humana sobre la Tierra? La respuesta a esta pregunta tiene que estar necesariamente basada en muchos imponderables; en parte, quizás depende del propio hombre y de las características de su evolución social durante el próximo siglo. A la luz de los hechos presentados en este libro, y que pueden ser consultados y comprobados en otros muchos documentos, parece obvio que los hombres deben limar sus diferencias, llegar a un cierto equilibrio con las fuerzas que les rodean y colaborar totalmente a escala mundial para predecir cuándo y dónde se producirá la próxima catástrofe natural. Además, el conjunto de la humanidad debe estar dispuesto a aliviar los sufrimientos de los que viven en zonas diezmadas por grandes catástrofes, dirigiendo los recursos convenientes hacia donde sean más necesarios. En algunos campos ya se ha avanzado un poco en este sentido, pero aún queda mucho camino por recorrer; y hasta que la cooperación y la solidaridad internacionales no estén realmente asentadas, al parecer hay escasas

posibilidades de evitar errores monumentales, indecisiones y frías indiferencias ante futuros desastres. Únicamente a través de la cooperación internacional puede el hombre reducir los riesgos de su interferencia con las fuerzas de la naturaleza. Sólo así podrá evitar una mala utilización del ambiente, conservar los recursos naturales y explotar nuevas fuentes renovables de energía. La ciencia de la sismología ha avanzado hasta el punto de que actualmente es posible predecir los terremotos en ciertas zonas y mitigar sus efectos en otras. Las erupciones volcánicas pueden ya ser predichas con un elevado grado de precisión y todos los volcanes potenciales pueden ser cartografiados (mapas de riesgo volcánico) con el fin de ayudar a las autoridades en su labor legislativa contra la edificación en las zonas de gran peligro. Muchos países no están aún convenientemente equipados para predecir y controlar en la medida de lo posible las grandes catástrofes naturales. ¿Es esto culpa de los gobiernos o de los científicos? Por un lado, los gobiernos son reacios a financiar la investigación científica, cuyo coste estiman demasiado elevado, y no suelen tomar en consideración los valiosos subproductos que la misma proporciona. Por otro lado, muchos científicos prefieren estudiar las grandes catástrofes desde la relativa seguridad de sus torres de marfil, en donde su reputación no corre peligro. ¡La predicción y la mitigación de las grandes catástrofes necesita que estos hombres se sitúen en primera línea, en el frente de batalla, y no que dirijan el combate desde la retaguardia!

Únicamente nos damos cuenta de la insignificancia humana cuando nos hallamos inmersos en ejercicios mentales como los que hemos ido desgranando a lo largo de este libro, cuando examinamos las posibilidades de una edad de hielo en el hemisferio septentrional, o la inundación generalizada de todas las tierras bajas del mundo, o los efectos del impacto de un gran cuerpo extraterrestre. ¿Pero cuán insignificante sería realmente el hombre ante una de esas amenazadoras catástrofes? La estrecha cooperación entre todos los científicos y la aceptación de sus decisiones por parte de los gobiernos y autoridades militares podrían adelantar un gran paso si se quiere estar prevenido o al menos ser capaz de minimizar una catástrofe mundial. La contaminación del suelo, las aguas y el aire por la descuidada actuación del hombre puede hacer, si no se controla, que los océanos y la atmósfera lleguen a ser extremadamente tóxicos. La contaminación excesiva de nuestras ciudades por la indiscriminada producción de gases de combustión ya ha provocado no pocas molestias y perjuicios —perturbación cerebral, enfermedades respiratorias, por ejemplo. En muchos países se está preparando una legislación que posibilite el control de la situación; pero a menos que esta legislación se imponga de forma global contra toda clase de contaminación, no haremos más que auto-envenenarnos lentamente por el aire que respiramos, por los alimentos que ingerimos y por el agua que bebemos. Quizás haya un alto porcentaje de verdad en la típica historia de ciencia ficción que narra cómo un grupo selecto de seres se ven obligados a abandonar un planeta altamente contaminado en busca de un nuevo santuario. ¿Quién, por ejemplo, hace 100 años hubiese soñado que el hombre pondría un día el pie en la Luna?

Puede ser que el hombre como especie no esté destinado a vivir más que unos pocos millones de años antes de su extinción natural, pero, sin embargo, un conocimiento adecuado de los riesgos de la vida sobre la Tierra, combinado con la decidida voluntad de trabajar conjuntamente tanto para mitigar y evitar las peores consecuencias de las catástrofes geológicas como las de nuestra propia locura colectiva, en especial el desbocado crecimiento de población, servirán quizás para que no desaparezcamos antes de tiempo.

BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **Stephen Hawking.** *Una vida para la ciencia.* Michael White y John Gribbin
2. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
3. **La explosión demográfica.** *El principal problema ecológico.* Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich
4. **El monstruo subatómico.** *Una exploración de los misterios del Universo.* Isaac Asimov
5. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
6. **La evolución de la física.** Albert Einstein y Leopold Infeld
7. **El secreto del Universo.** *Y otros ensayos científicos.* Isaac Asimov
8. **Qué es la vida.** Joël de Rosnay
9. **Los tres primeros minutos del Universo.** Steven Weinberg
10. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
11. **El hombre mecánico.** *El futuro de la robótica y la inteligencia humana.* Hans Moravec
12. **La superconductividad.** *Historia y leyendas.* Sven Ortoli y Jean Klein
13. **Introducción a la ecología.** *De la biosfera a la antroposfera.* Josep Peñuelas
14. **Miscelánea matemática.** Martin Gardner
15. **El Universo desbocado.** *Del Big Bang a la catástrofe final.* Paul Davies
16. **Biotecnología.** *Una nueva revolución industrial.* Steve Prentis
17. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
18. **A través de la ventana.** *Treinta años estudiando a los chimpancés.* Jane Goodall
19. **Einstein.** Banesh Hoffmann
20. **La doble hélice.** *Un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADN.* James Watson
21. **Cien mil millones de soles.** *Estructura y evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
22. **El planeta viviente.** *La adaptación de las especies a su medio.* David Attenborough
23. **Evolución humana.** Roger Lewin
24. **El divorcio entre las gaviotas.** *Lo que nos enseña el comportamiento de los animales.* William Jordan
25. **Lorenz.** Alec Nisbett
26. **Mensajeros del paraíso.** *Las endorfinas, drogas naturales del cerebro.* Charles F. Levinthal
27. **El Sol brilla luminoso.** Isaac Asimov
28. **Ecología humana.** *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
29. **Sol, lunas y planetas.** Erhard Keppler
30. **Los secretos de una casa.** *El mundo oculto del hogar.* David Bodanis
31. **La cuarta dimensión.** *Hacia una geometría más real.* Rudy Rucker
32. **El segundo planeta.** *El problema del aumento de la población mundial.* U. Colombo y G. Turani
33. **La mente (I).** Anthony Smith
34. **La mente (II).** Anthony Smith
35. **Introducción a la química.** Hazel Rossotti
36. **El envejecimiento.** David P. Barash
37. **Edison.** Fritz Vögtle